# UTILISATION DES FUMEES DE SILICE EN VUE D'AMELIORER LA RESISTANCE A COURT TERME DE CIMENTS AUX CENDRES VOLANTES

(CONTRAT 24SU.23440-2-9087 - NUMERO DE SERIE OSU82-00252)

présenté par

Pierre-Claude AITCIN et Roland FORTIN

de la

Faculté des Sciences Appliquées

de l'

Université de Sherbrooke

MICROMEDIA

63 pp

Mars 1983

TABLE DES MATIERES


1. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

2. MATERIAUX UTILISES
   - ciment
   - cendre volante
   - fumées de silice
   - granulats

3. RESULTATS OBTENUS (voir Annexe)

4. ANALYSE DES RESULTATS

   4.1 Propriété du béton frais

      4.1.1 Quantité de superplastifiant

      4.1.2 Teneur en air

      4.1.3 Masse volumique

   4.2 Propriétés du béton durci

      4.2.1 Résistance en compression

      4.2.2 Résistance en flexion

      4.2.3 Module d'élasticité

      4.2.4 Retrait au séchage des bétons après 7 jours de mûrissement dans l'eau

      4.2.5 Retrait au séchage des bétons après 28 jours de mûrissement dans l'eau

      4.2.6 Résistance en compression à 56 d

      4.2.7 Résistance en compression à 91 d

      4.2.8 Retrait au séchage à 91 d

5. CONCLUSION

6. RECOMMANDATION

7. REMARQUE SUR LA VARIATION DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE DE SILICE

ANNEXES

Composition des bétons — Tableaux A-1, A-2, A-3

Caractéristiques des bétons — Tableaux A-4, A-5, A-6

Vérification de la résistance à 28 d des gâchées répétitives.

## 1. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Lorsque dans un béton on remplace une certaine quantité de ciment par des cendres volantes on constate en général que le béton obtenu présente des résistances à court terme plus faibles que celles du béton ne contenant que du ciment portland. En effet, l'action pouzzolanique des cendres volantes ne se fait généralement sentir qu'après 28 ou 56 jours. De façon à voir s'il est possible de corriger ce défaut des bétons aux cendres volantes, il a été décidé d'incorporer des quantités croissantes de fumée de silice dans un liant mixte contenant 30% (en masse) de cendres volantes. Comme on peut le voir sur la Figure 1 on a donc remplacé successivement 5, 10, 15 et 20% de la masse du ciment par des fumées de silice si bien que le dernier liant mixte étudié avait la composition massique suivante:

50% de ciment portland de type 10

30% de cendres volantes

et 20% de fumées de silice.

On a effectué sur chacun des bétons tous les essais qui apparaissent dans le tableau 1-A. Etant donné que chaque gâchée était répétée 4 fois pour chacun des bétons, on a vérifié la constance des gâchées en prélevant des échantillons dont on a déterminé la résistance à 28 jours.

On a étudié 3 séries de béton ayant des rapports Eau/Liant de 0,35, 0,50 et 0,65 comme on peut le voir sur la Figure 2. La procédure de malaxage est celle représentée dans la Figure 3 et le nombre d'échantillons prélevés est représenté dans le tableau 1-B.

Dans un premier temps nous avons ajusté l'affaissement des 3 bétons de référence à 75 mm.

Dans un second temps nous avons fabriqué les 3 bétons de contrôle en essayant d'utiliser la même quantité d'eau de gâchage. L'affaissement du béton de contrôle ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 est ainsi passé de 75 à 85 mm, celui du béton de contrôle ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 est passé de 75 à 80 mm, par contre le béton de contrôle ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 n'ayant pratiquement aucun affaissement nous avons été obligés de rajouter une certaine quantité de superplastifiant pour obtenir un affaissement de 80 mm.

Par la suite l'affaissement des bétons contenant des fumées de silice a été ajusté à celui du béton de contrôle de même rapport E/C à ± 5 mm près.

## 2. MATERIAUX UTILISES

On trouvera dans le tableau 2 la composition chimique du ciment de la cendre volante et de la fumée de silice utilisés. Dans le tableau 3 nous avons reporté les caractéristiques physiques des matériaux utilisés. La Figure 4 représente les courbes granulométriques du granulat fin et du gros granulat.

## 3. RESULTATS OBTENUS

On trouvera dans l'annexe la composition détaillée des bétons dans les tableaux A-1, A-2, et A-3 ainsi que les caractéristiques des bétons frais et durcis dans les tableaux A-4, A-5 et A-6.

Dans le tableau A-7 on pourra trouver les essais de vérification de la résistance à 28 jours des gâchées répétitives.

3°) la différence de résistance en compression à 7 jours entre les bétons de référence et les bétons aux fumées de silice est fonction du rapport Eau/Liant. Lorsque ce rapport Eau/Liant est élevé 0,65, les bétons aux fumées de silice se comportent comme le béton de contrôle, c'est-à-dire que leur résistance en compression est semblable à celle des bétons de contrôle et bien inférieure à celle du béton de référence.

Lorsque le rapport Eau/Liant est égal à 0,50 on observe encore pratiquement le même comportement.

Par contre, lorsque le rapport Eau/Liant est égal à 0,35 on peut noter que les bétons aux fumées de silice ont une résistance en compression semblable à celle du mélange de référence.

Sur la Figure 10 nous avons comparé la résistance en compression des différents mélanges en utilisant comme base de comparaison la résistance en compression du béton de référence ne contenant que du ciment de type 10.

On constate que l'addition de 5% de fumée de silice au mélange de contrôle permet d'obtenir des résistances à 28 jours égales à celles du béton de référence. Il semble cependant que l'on obtienne les meilleurs résultats en additionnant 10% de silice. Au-delà de ce pourcentage les résistances en compression à 28 jours semblent plafonnées au même niveau que celles du béton de référence.

# 4. ANALYSE DES RESULTATS

## 4.1 Propriété du béton frais

### 4.1.1 Quantité de superplastifiant

Comme on peut le voir sur la Figure 5 le dosage en superplastifiant nécessaire pour maintenir un affaissement constant est une fonction linéaire du pourcentage de silice ajoutée au mélange de contrôle. On peut cependant noter que la pente de cette droite augmente au fur et à mesure que le rapport Eau/Liant diminue.

Sur la Figure 6, nous avons reporté l'ensemble des résultats obtenus en portant en abscisse la quantité de cendre volante et de fumée de silice.

Comme on peut le voir sur les Figures 5 et 6 la substitution de 30% de ciment par de la cendre volante n'a pas entraîné de réduction d'eau de gâchage significative. Même au contraire pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 il a fallu rajouter une dose de superplastifiant dans les mélanges de contrôle pour obtenir le même affaissement qu'avec le mélange de référence. (Voir la remarque en Annexe).

### 4.1.2 Teneur en air

Comme on peut le constater dans le tableau 4 le fait d'ajouter de la cendre volante ou des fumées de silice n'a que peu d'effet sur la teneur en air des bétons. Tout au plus on peut noter que la teneur en air des bétons a diminué au fur et à mesure que le rapport Eau/Liant augmentait, que ce soit aussi bien pour les bétons de référence que ceux de contrôle ou ceux contenant des fumées de silice.

4.1.3 Masse volumique

Nous avons reporté sur la Figure 6 bis, la masse volumique des différents bétons étudiés en fonction du pourcentage de silice introduit. Comme on peut le constater c'est le mélange ayant un rapport Eau/Liant de 0,5 qui a permis d'obtenir les bétons les plus denses, les bétons les moins denses ayant été obtenus avec le rapport Eau/Liant de 0,35. *Plus on ajoute des fumées de silice dans le béton, plus la masse volumique du béton diminue.* Cette décroissance est due au fait que l'on a substitué au ciment ayant une densité de 3,14 une cendre volante ayant une densité de 2,47 et des fumées de silice ayant une densité de 2,26, le surplus de volume ayant été soustrait au sable dont la densité est de 2,63.

4.2 Propriétés du béton durci

4.2.1 Résistance en compression

Nous avons reporté sur les Figures 7, 8 et 9 la résistance en compression des bétons ayant des rapports Eau/Liant respectifs de 0,35, 0,50 et 0,65. En examinant ces différentes figures on peut constater les faits suivants:

1°) tous les bétons de contrôle ont une résistance à 28 jours très inférieure à celle du béton de référence,

2°) quelle que soit la quantité de fumée de silice introduite dans le liant, la résistance à 28 jours des bétons aux fumées de silice est pratiquement la même que celle du béton de référence,

4.2.2 Résistance en flexion

Nous avons reporté dans les tableaux 5 et 6 la résistance en flexion des différents bétons ainsi que leur résistance à la traction mesurée selon l'essai brésilien. En observant ces deux tableaux on peut constater:

1°) que c'est toujours le béton de contrôle qui a les plus faibles résistances aussi bien à 14 jours qu'à 28 jours,

2°) que la résistance à la flexion ou à la traction des bétons aux fumées de silice est pratiquement la même que celle du mélange de référence à 28 jours. Par contre à 14 jours cette résistance est légèrement inférieure à celle du béton de référence tout en étant supérieure à celle du béton de contrôle. Ces résultats sont très semblables à ceux obtenus lors de l'étude de la résistance en compression des différents bétons.

4.2.3 Module d'élasticité

Nous avons reporté dans les Figures 11, 12 et 13 les courbes contraintes/déformations obtenues pour les différents bétons ayant des rapports Eau/Liant respectifs de 0,35, 0,50 et 0,65. L'ensemble des valeurs des modules d'élasticité que nous avons obtenu a été transcrit dans le tableau 7.

Lors de la mesure des modules d'élasticité des différents bétons, nous n'avons appliqué qu'une précharge égale à 20% seulement de la résistance en compression estimée au lieu d'une précharge de 40% comme cela se fait habituellement. Cette différence de

procédure n'affecte pas les valeurs moyennes des modules d'élasticité mais entraîne simplement une plus grande dispersion dans les résultats obtenus.

En observant les résultats présentés dans le tableau 7 on peut constater:

1°) que le module d'élasticité du béton de référence décroit au fur et à mesure que le rapport eau/ciment augmente,

2°) que le module d'élasticité des mélanges de contrôle est toujours inférieur à celui des mélanges des références,

3°) que le module d'élasticité des bétons contenant des fumées de silice est à peu près le même que celui du béton de référence, peut être très légèrement inférieur.

4.2.4 Retrait au séchage des bétons après 7 jours de mûrissement dans l'eau

Nous avons reporté dans les Figures 14, 15 et 16 les retraits au séchage des bétons ayant respectivement des rapports Eau/Liant de 0,35, 0,50 et 0,65. Comme on peut le constater ce sont toujours les bétons de référence et les bétons de contrôle qui dans ce cas présentent le moins de retrait. Les bétons contenant des fumées de silice ont en effet quelle que soit la durée du séchage à l'air des retraits supérieurs à celui de ces 2 bétons.

4.2.5 Retrait au séchage des bétons après 28 jours de mûrissement dans l'eau

Nous avons reporté dans les Figures 17, 18, et 19 les résultats obtenus lors de la mesure du retrait au séchage des bétons ayant respectivement des rapports Eau/Liant de 0,35, 0,50 et 0,65.

Comme on peut le constater sur ces figures cette fois-ci c'est toujours le béton de contrôle et de référence qui présentent les retraits les plus grands, les bétons aux fumées de silice ayant des retraits légèrement inférieurs.

4.2.6 Résistances en compression à 56 d

Comme on peut le constater sur la Figure 20 les bétons contenant des cendres volantes et des fumées de silice ont une résistance à 56 d supérieure à celle du béton de référence. Les plus faibles résistances en compression sont toujours obtenues avec les bétons de contrôle. Cependant on peut noter une différence de comportement notable entre le béton de référence et le béton de contrôle comme on peut le voir sur la Figure 21. Alors que la résistance en compression du béton de référence n'augmente que très faiblement entre 28 et 56 d (pente très faible) on note une augmentation sensible de celle du béton de contrôle (pente nettement ascendante).

Cette augmentation de résistance est inversement proportionnelle au rapport Eau/Liant du béton comme on peut le voir sur la Figure 22 où nous avons reporté l'accroissement de résistance en MPa/d entre 28 et 56 d et le rapport Eau/Liant.

D'après nous ce phénomène devrait être relié à la quantité croissante de chaux libérée lors de l'hydratation du ciment lorsque le rapport Eau/Liant baisse. Plus il y a de chaux dans le béton par unité de volume, plus la quantité de cendre volante qui réagit effectivement avec la chaux est grande.

Il semble que le même phénomène se répète lorsqu'il y a des fumées de silice dans le béton.

4.2.7 Résistance en compression à 91 d

Si l'on compare l'allure des courbes des figures 10, 20 et 23 on s'aperçoit que c'est toujours pour un dosage de 10% de fumées de silice que l'on obtient les meilleures résistances en compression. Il est inutile de rajouter plus de fumées de silice dans le mélange car on n'améliore guère la résistance en compression du mélange, les fumées de silice ne sont alors guère plus efficaces que le ciment portland.

L'augmentation de la résistance par rapport au mélange de contrôle n'est cependant que de l'ordre de 10%. Les cendres volantes ont commencé à réagir et n'ont plus besoin de l'aide des fumées de silice.

Les fumées de silice permettent donc d'augmenter la résistance en compression à court terme des bétons aux cendres volantes mais ne semblent avoir que peu d'effet sur la résistance finale du béton.

Sur les figures 24, 25 et 26 nous avons reporté les résistances en compression jusqu'à 91d selon un mode logarithmique qui nous permettra de placer les résultats des essais à 180 d lorsqu'ils seront disponibles.

4.2.8 Retrait au séchage à 91 d (Figures 27 à 32)

Nous avons reporté sur des graphiques en mode logarithmique les retraits au séchage des différents bétons après 7 et 28 jours de mûrissement dans l'eau. Comme on peut le voir sur ces différentes figures, le retrait au séchage de tous les bétons étudiés progresse de façon semblable et les différences observées entre les mélanges sont négligeables.

## 5. CONCLUSION

Un liant ternaire contenant 60% de ciment portland de type 10, 30% de cendre volante et 10% de fumées de silice permet de fabriquer des bétons ayant pratiquement les mêmes caractéristiques à 28 d (résistance en compression, résistance en flexion, module d'élasticité, retrait au séchage) qu'un béton ne contenant que du ciment pur.

Le liant linaire contenant 70% de ciment portland de type 10, et 30% de cendre volante conduit par contre à des résistances en compression à 28 d beaucoup plus faibles. Il faut attendre 91 d pour voir réellement se développer la réaction pouzzolanique de la cendre volante.

## 6. RECOMMANDATION

Nous suggérons de limiter à 10% l'utilisation des fumées de silice pour augmenter la résistance à court terme des bétons contenant 30% de cendre volante de classe F.

## 7. REMARQUE SUR LA VARIATION DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE DE SILICE

En se référant à la Figure 5 donnant les dosages en superplastifiant

en fonction des pourcentages massiques de liant substitué au ciment, on s'aperçoit que le mélange de contrôle ayant le rapport Eau/Liant de 0,50 n'est pas aligné avec les autres points de la droite qui représentent le dosage en superplastifiant nécessaire pour maintenir l'affaissement du mélange de contrôle dans les mélanges contenant des fumées de silice. Ceci est dû au fait que l'affaissement de ces bétons fut ajusté à 80 mm. Cette légère différence d'affaissement de 85 mm à 80 mm n'a pas été compensée par l'ajoût de superplastifiant. Ainsi, si tous les bétons contenant des fumées de silice ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 avaient eu un affaissement ajusté à 85 mm, il est fort probable que tous les points auraient été alignés.

# LISTE DES TABLEAUX

1-A - Essais effectués sur les différents bétons

1-B - Répartition de la charge de travail

2- Analyse chimique des différents liants utilisés

3- Caractéristiques physiques des matériaux

4- Teneur en air des différents bétons

5- Résistance à la flexion des différents bétons pour les trois rapports Eau/Liant

6- Résistance à la traction (essai brésilien) des différents bétons pour les trois rapports Eau/Liant

7- Module d'élasticité des différents bétons.

| TYPE D'ESSAI | | | Jour des essais | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | 91 | 180 |
| Résistance en compression (cylindres plastiques 100 x 100 mm) | | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Résistance en flexion (poutres 100 x 100 x 375 mm) | | | | | | X | X | | | |
| Essai brésilien (cylindres plastiques 100 x 200 mm) | | | | | | | X | | | |
| Module d'élasticité (cylindres acier 150 x 300 mm) | | | | | | | X | | | |
| Retrait (Poutres 100 x 100 x 375 mm) | SERIE | 1 | EAU (7 d) | | | AIR | | | | |
| | | 2 | EAU (28 d) | | | | AIR | | | |
| | | 3 | EAU | | | | | | | |

Tableau 1-A - Essais effectués sur les différents bétons

| | |
|---|---|
| Nombre de gâchées réalisées | 72 |
| Volume de béton utilisé | $\simeq 3\ m^3$ |
| Nombre de cylindres 100 x 200 mm confectionnées | 540 |
| Nombre de cylindres 150 x 300 mm confectionnés | 54 |
| Nombre de poutres 100 x 100 x 375 mm confectionnées | 216 |

Tableau 1-B - Répartition de la charge de travail

| | Ciment Type 10 | Cendre volante | Fumées de silice |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 21,1 | 40,7 | 92 |
| $Al_2O_3$ | 4,4 | 23,3 | 0,3 |
| $Fe_2O_3$ | 2,8 | 16,7 | 0,8 |
| CaO (total) | 64,3 | 3,30 | 0,3 |
| CaO (libre) | 0,8 | - | - |
| MgO | 2,8 | 0,9 | 0,3 |
| $Na_2O$ | - | 0,4 | 0,2 |
| $K_2O$ | - | 1,5 | 1,0 |
| C | - | 7,5 | 3,8 |
| P.A.F. | 1,0 | 9,5 | 3,2 |

Tableau 2- Analyse chimique des différents liants utilisés.

| Nature et provenance | |
|---|---|
| Gros granulat: Calcaire métamorphique (Lime Ridge) | - Absorption : 0,4%<br>- $d_{SSS}$ : 2,70<br>- Masse volumique: 1610 kg/m$^3$<br>(40% 20 mm- 40% 14 mm- 20% 5 mm) |
| - Sable naturel (Aimé Côté) | - Absorption : 1,2%<br>- $d_{SSS}$ : 2,63 |
| - Cendre volante (Lakeview) | - $d_S$ : 2,47<br>demande en eau : 100%(ASTM C 618)<br>activité pouzzolanique: 77% |
| - Fumées de silice (SKW) | - $d_S$ : 2,26<br>demande en eau : 138%(ASTM C 618)<br>activité pouzzolanique: 100% |
| - Ciment Type 10 Lafarge | - Blaine 345 m$^2$/kg |

Tableau 3- Caractéristiques physiques des matériaux

| Pourcentage d'air en % | E/L | 0,35 | 0,50 | 0,65 |
|---|---|---|---|---|
| | Référence | 1,5 | 1,4 | 1,2 |
| | Contrôle | 1,6 | 1,4 | 1,1 |
| | $SiO_2$ | 1,6 | 1,4 | 1,2 |

Tableau 4 - Teneur en air des différents bétons

| Identification des mélanges | RESISTANCE A LA FLEXION (MPa) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | E/L 0,65 | | E/L 0,50 | | E/L 0,35 | |
| | 14 d | 28 d | 14 d | 28 d | 14 d | 28 d |
| Référence | 4,2 | 4,8 | 5,4 | 5,7 | 6,6 | 6,9 |
| Contrôle (30% C.V.) | 3,3 | 3,9 | 4,8 | 5,1 | 5,1 | 5,7 |
| 30% C.V. + 5% $SiO_2$ | 3,6 | 4,6 | 4,8 | 5,4 | 5,7 | 6,9 |
| 30% C.V. + 10% $SiO_2$ | 3,8 | 4,7 | 5,3 | 5,7 | 6,3 | 6,9 |
| 30% C.V. + 15% $SiO_2$ | 3,9 | 4,8 | 5,2 | 5,7 | 6,3 | 7,0 |
| 30% C.V. + 20% $SiO_2$ | 3,7 | 4,5 | 4,6 | 6,0 | 6,0 | 6,9 |

Tableau 5- Résistance à la flexion des différents bétons pour les trois rapports E/L.

| Identification des mélanges | Résistance à la traction (Essai brésilien) à 28 d (MPa) | | |
|---|---|---|---|
| | E/L : 0,65 | E/L: 0,50 | E/L: 0,35 |
| Référence | 2,8 | 3,3 | 3,9 |
| Contrôle (30% C.V.) | 2,3 | 3,4 | 3,4 |
| 30% C.V. + 5% $SiO_2$ | 2,5 | 3,0 | 4,8 |
| 30% C.V. + 10% $SiO_2$ | 2,5 | 2,9 | 4,0 |
| 30% C.V. + 15% $SiO_2$ | 2,8 | 3,2 | 4,0 |
| 30% C.V. + 20% $SiO_2$ | 2,9 | 3,4 | 3,9 |

Tableau 6 - Résistance à la traction (Essai brésilien)des différents bétons pour les trois rapports EAU/LIANT.

| | Module d'élasticité à 28 d | | |
|---|---|---|---|
| E/L | 0,35 | 0,50 | 0,65 |
| Référence | 35,5 | 32,1 | 31,7 |
| Contrôle | 31,9 | 29,7 | 28,6 |
| 5% | 31,0 | 33,3 | 28,8 |
| 10% | 34,7 | 31,4 | 26,7 * |
| 15% | 34,5 | 30,4 | 29,8 |
| 20% | 33,4 | 29,7 | 31,0 |

Tableau 7- Module d'élasticité des différents bétons.

LISTE DES FIGURES

1. Différents liants étudiés
2. Différents rapports Eau/Liant utilisés
3. Procédure de malaxage
4. Granulométrie des granulats utilisés
5. Dosage en superplastifiant nécessaire pour maintenir un affaissement constant en fonction du pourcentage de silice ajouté au mélange de contrôle.
6. Dosage en superplastifiant nécessaire pour maintenir un affaissement constant en fonction de la masse de cendre volante et de fumées de silice substituées au ciment.
6 bis. Variation de la masse volumique en fonction de la composition des bétons pour les trois rapports Eau/Liant étudiés.
7. Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,35.
8. Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,50.
9. Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,65.
10. Pourcentage de la résistance atteinte à 28 d pour les différents bétons, par rapport aux mélanges de référence pour les trois rapports E/L.
11. Module d'élasticité des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,35.
12. Module d'élasticité des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,50.
13. Module d'élasticité des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,65.
14. Retrait au séchage des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 après 7 jours de mûrissement dans l'eau.
15. Retrait au séchage des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 après 7 jours de mûrissement dans l'eau.
16. Retrait au séchage des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 après 7 jours de mûrissement dans l'eau.
17. Retrait au séchage des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 après 28 jours de mûrissement dans l'eau.
18. Retrait au séchage des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 après 28 jours de mûrissement dans l'eau.
19. Retrait au séchage des bétons ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 après 28 jours de mûrissement dans l'eau.

20. Pourcentage de la résistance atteinte à 56 d pour les différents bétons, par rapport aux mélanges de référence pour les trois rapports Eau/Liant.
21. Comparaison des résistances en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges de référence et de contrôle pour les trois rapports Eau/Liant.
22. Accroissement de la résistance des mélanges de contrôle (30% C.V.) entre 28 d et 56 d en fonction du rapport Eau/Liant.
23. Pourcentage de la résistance atteinte à 91 d pour les différents bétons par rapport aux mélanges de référence pour les trois rapports Eau/Liant.
24. Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,35.
25. Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,50.
26. Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,65.
27. Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 qui a été mûri 7 d dans l'eau.
28. Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 qui a été mûri 7 d dans l'eau.
29. Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 qui a été mûri 7 d dans l'eau.
30. Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 qui a été mûri 28 d dans l'eau.
31. Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 qui a été mûri d8 d dans l'eau.
32. Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

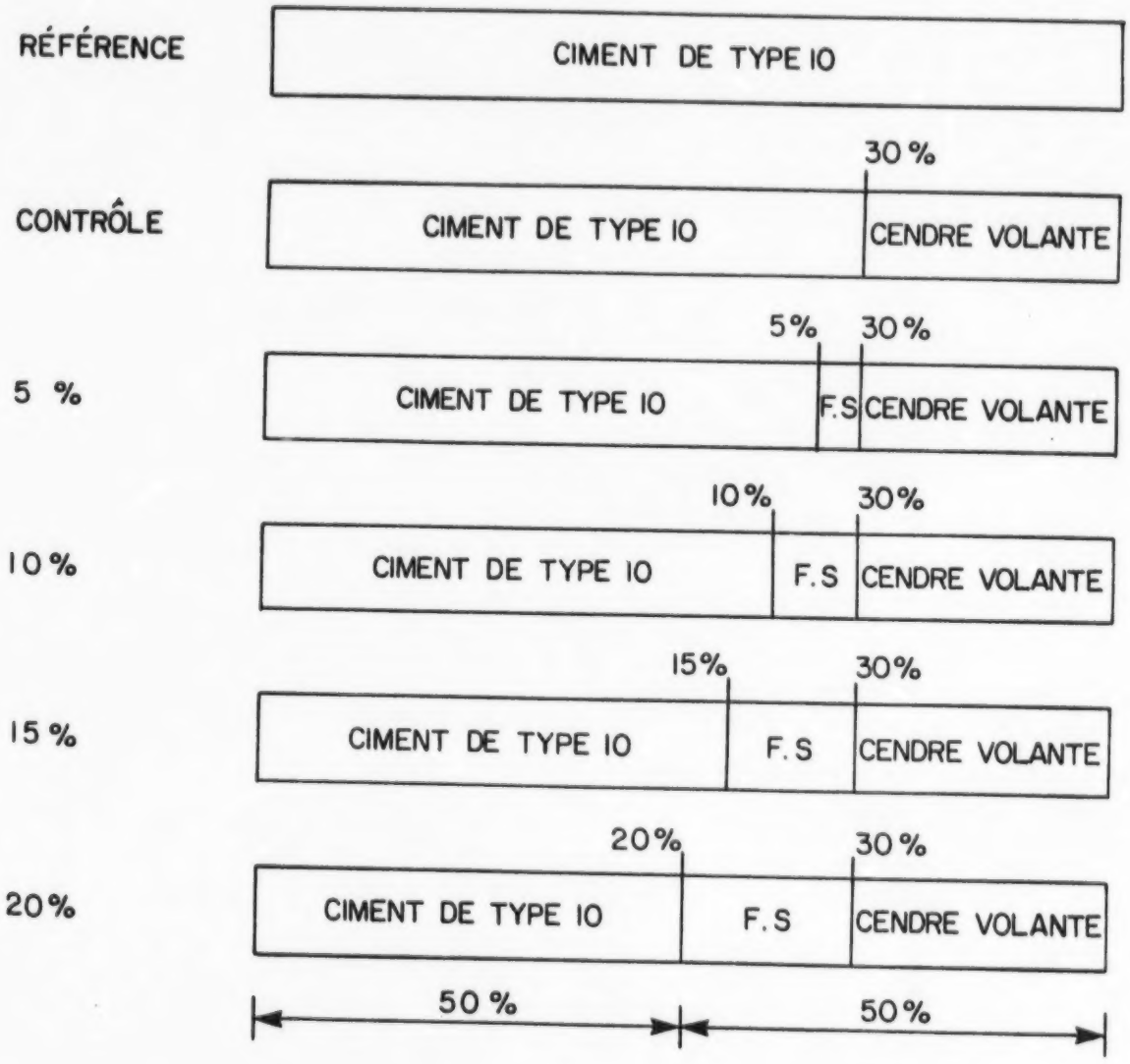



Figure 1 - Différents liants étudiés

| EAU / LIANT 0,35 | EAU / LIANT 0,50 | EAU / LIANT 0,65 |
|---|---|---|

Figure 2 - Différents rapports Eau/Liant utilisés

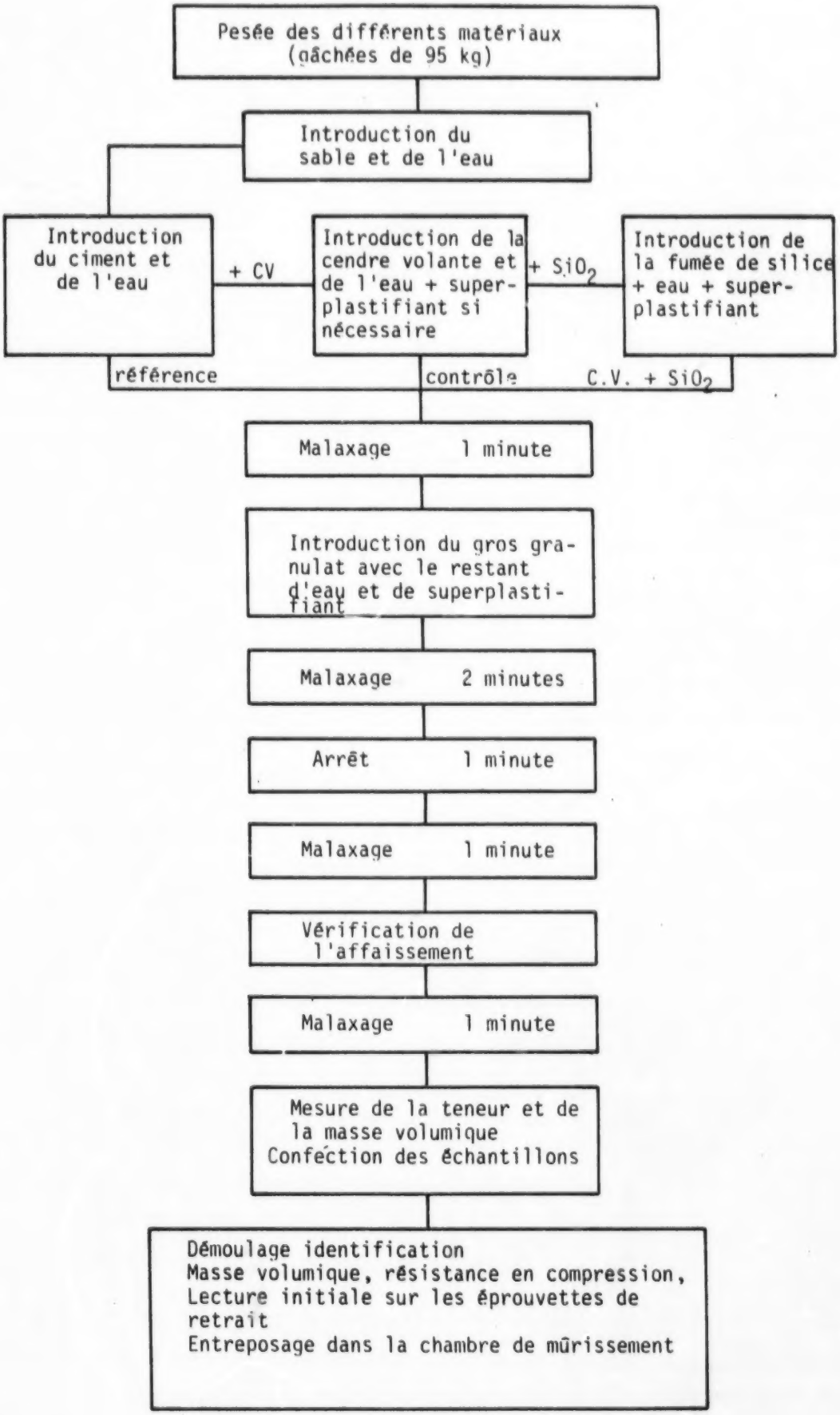
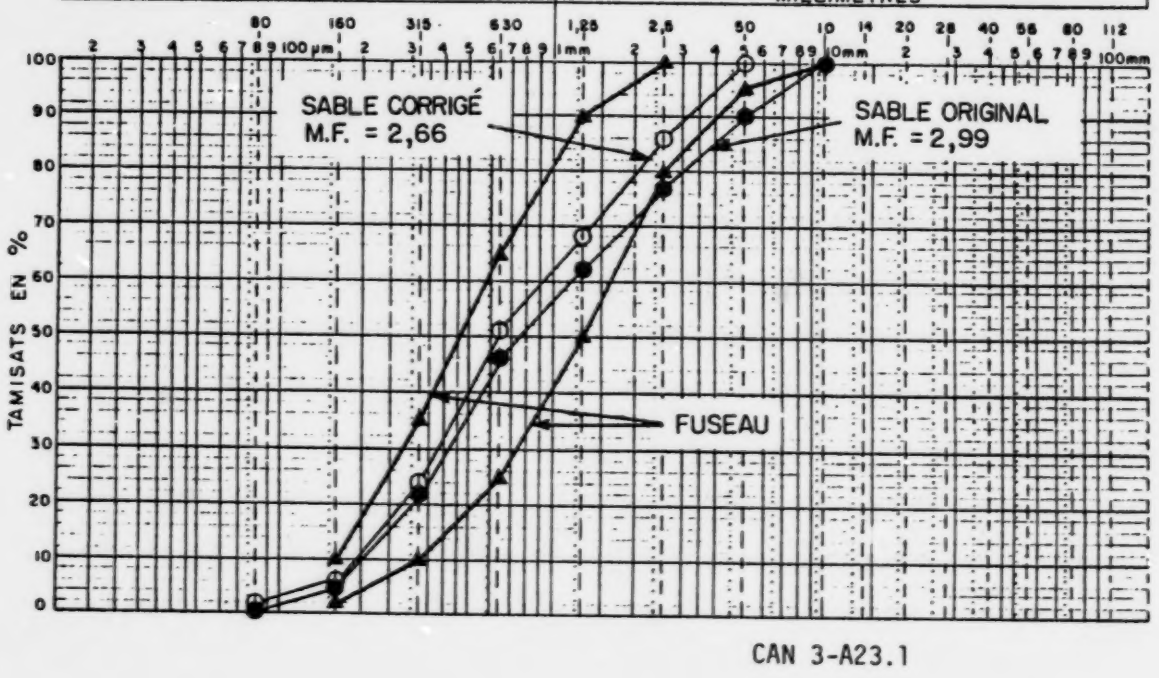



Figure 3 - Procédure de malaxage

UNIVERSITE DE SHERBROOKE
LABORATOIRE DE MATERIAUX

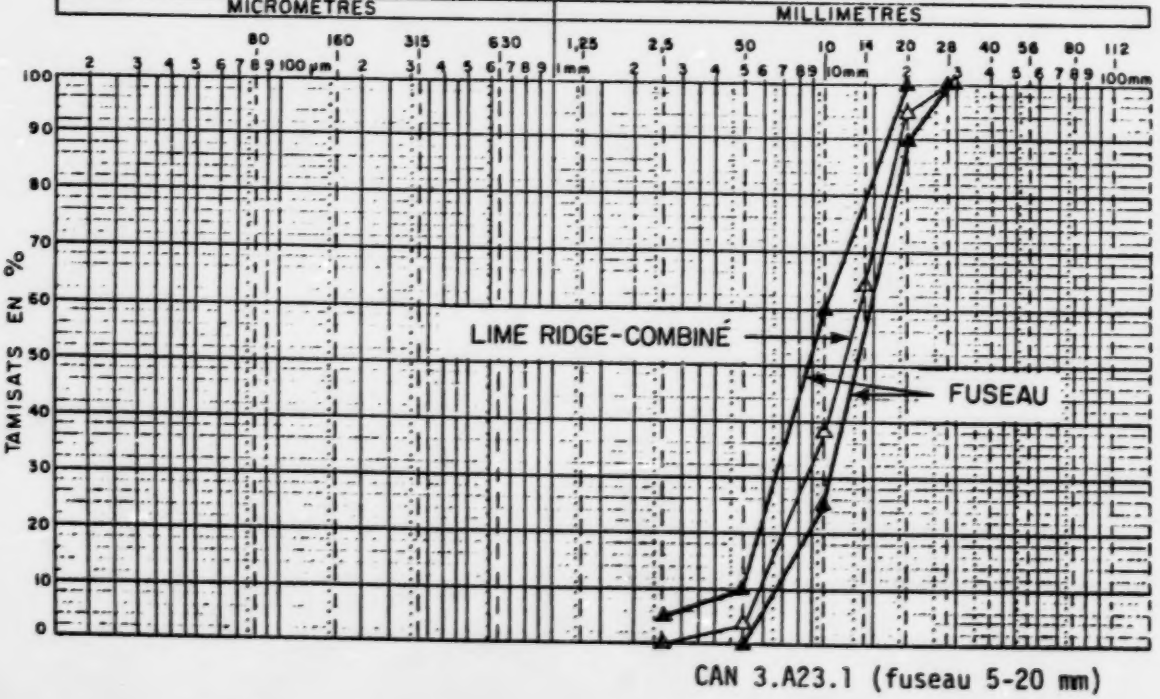
## ANALYSE GRANULOMETRIQUE

PROJET: _____ SITE: _____ ECHANTILLON NO: ____
DESCRIPTION DU GRANULAT: _____




CAN 3-A23.1

PROJET: _____ SITE: _____ ECHANTILLON NO: ____
DESCRIPTION DU GRANULAT: _____




CAN 3.A23.1 (fuseau 5-20 mm)

Figure 4 - Granulométrie des granulats utilisés

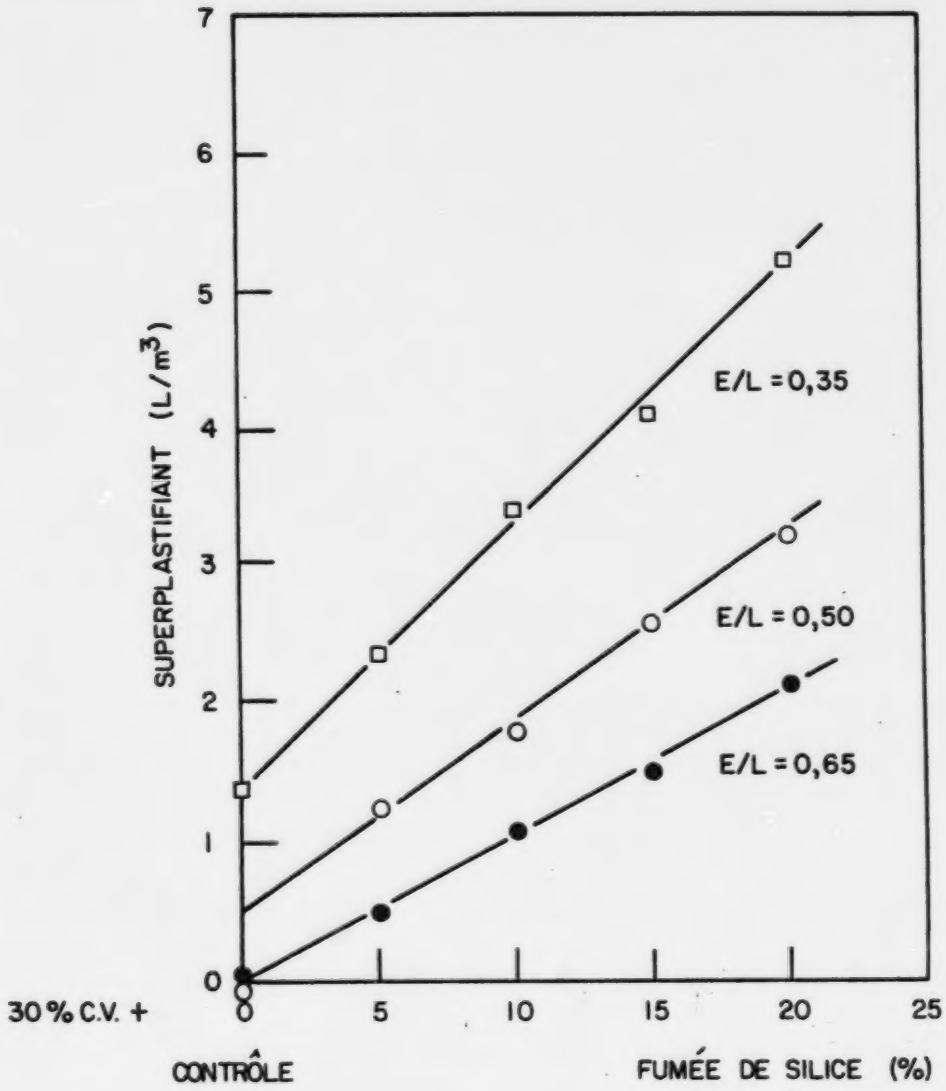



Figure 5 - Dosage en superplastifiant nécessaire pour maintenir un affaissement constant en fonction du pourcentage de silice ajoutée au mélange de contrôle.

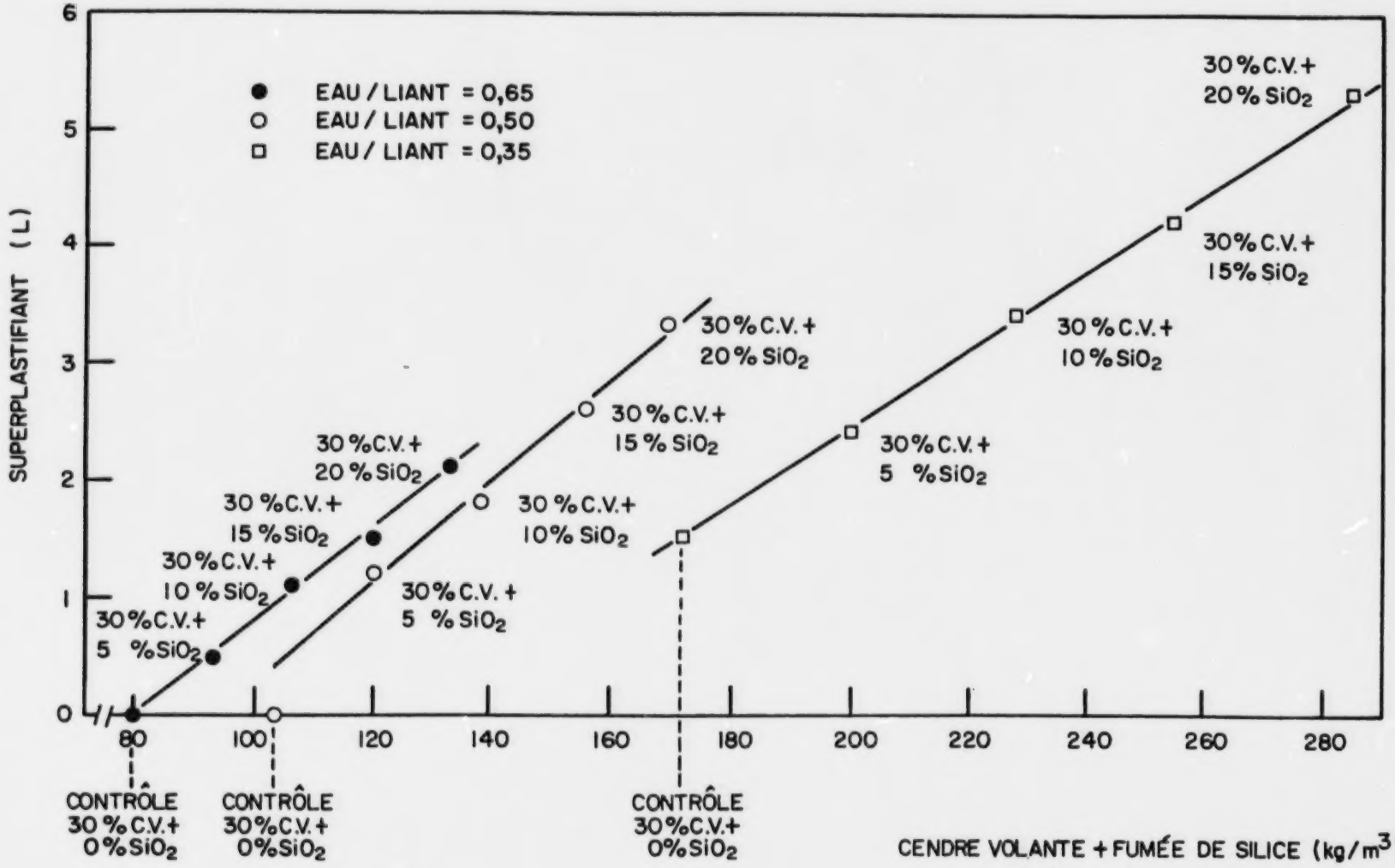



Figure 6 - Dosage en superplastifiant nécessaire pour maintenir un affaissement constant en fonction de la masse de cendre volante et de fumée de silice substituée au ciment.

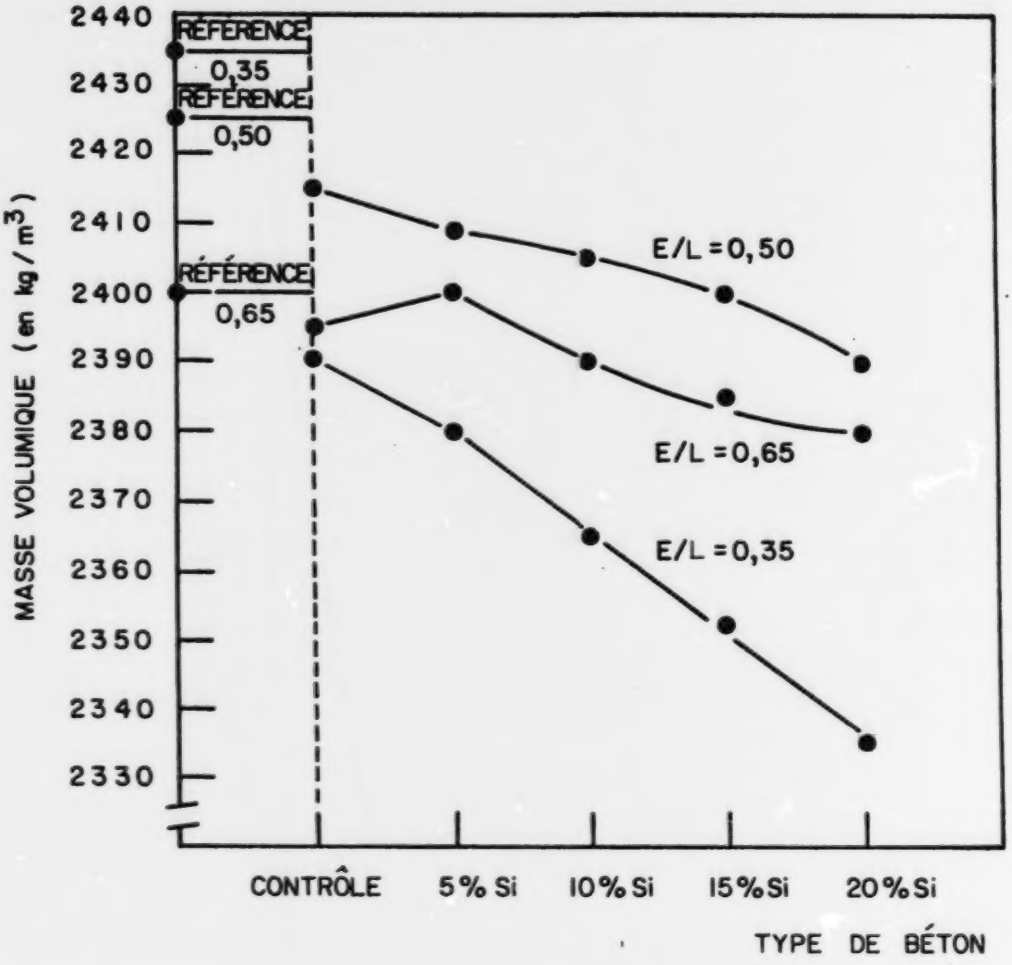



Figure 6 bis- Variation de la masse volumique en fonction de la composition des bétons pour les trois rapports eau/liant étudiés.

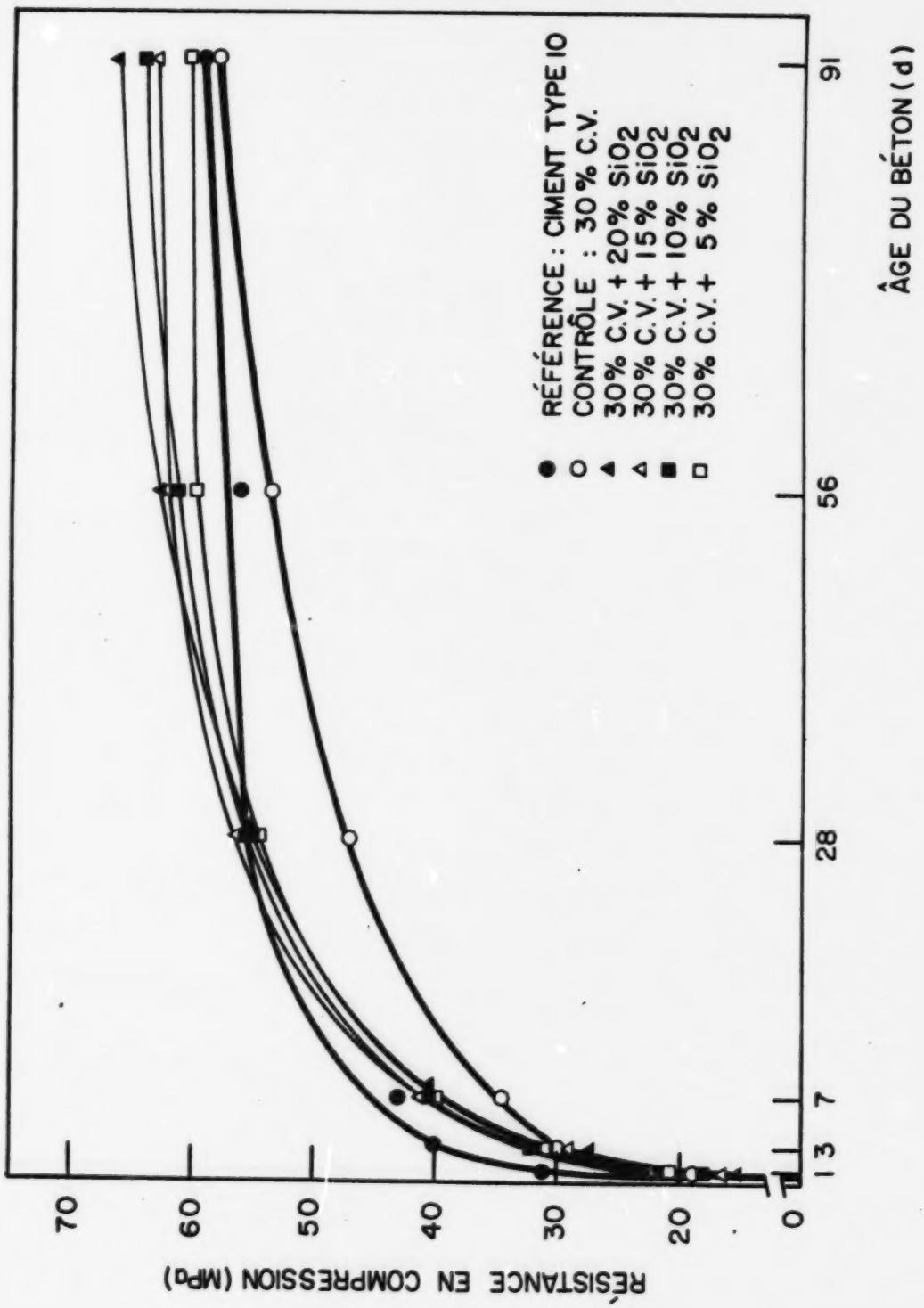



Figure 7 - Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,35.

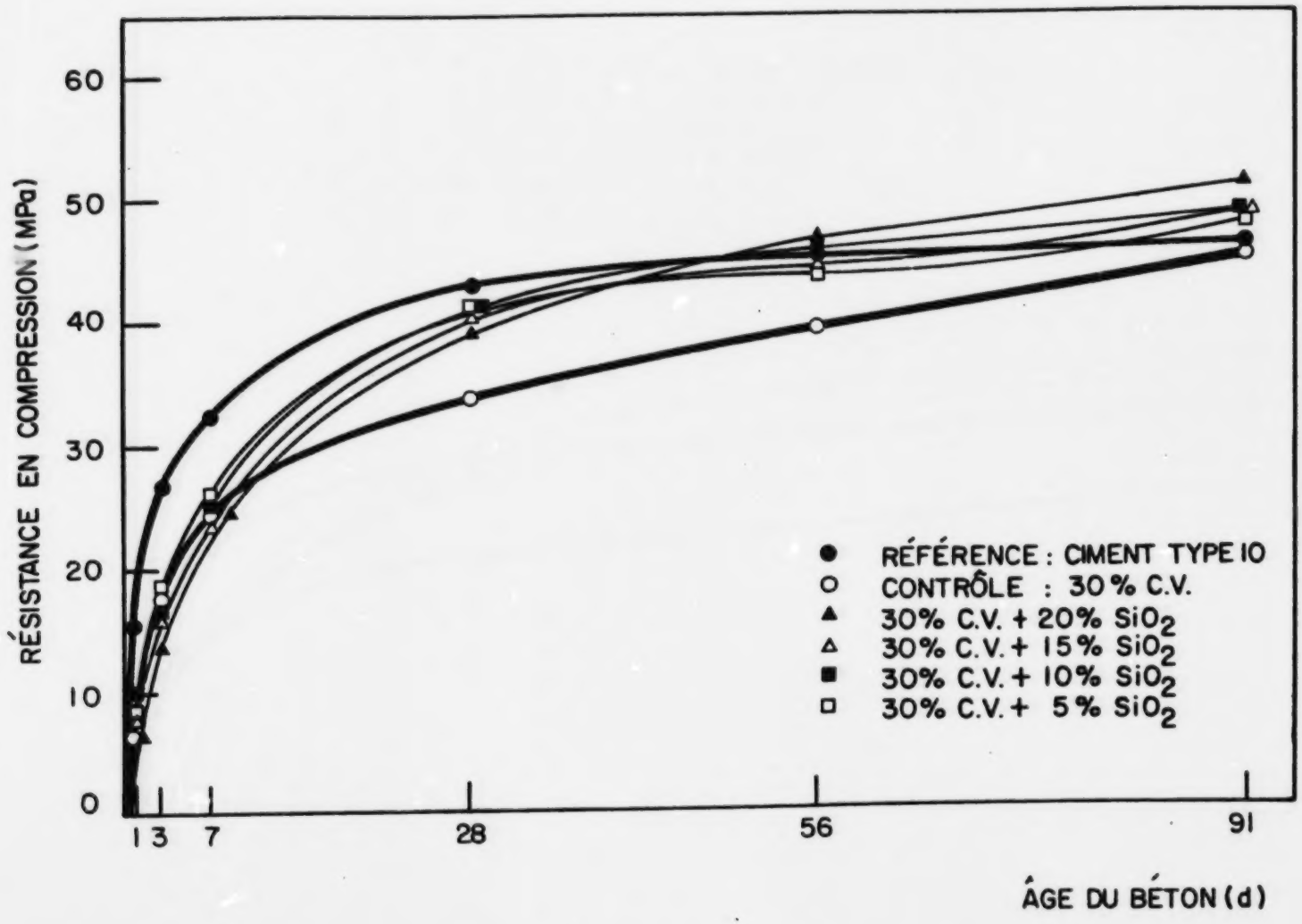



Figure 8 - Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,50.

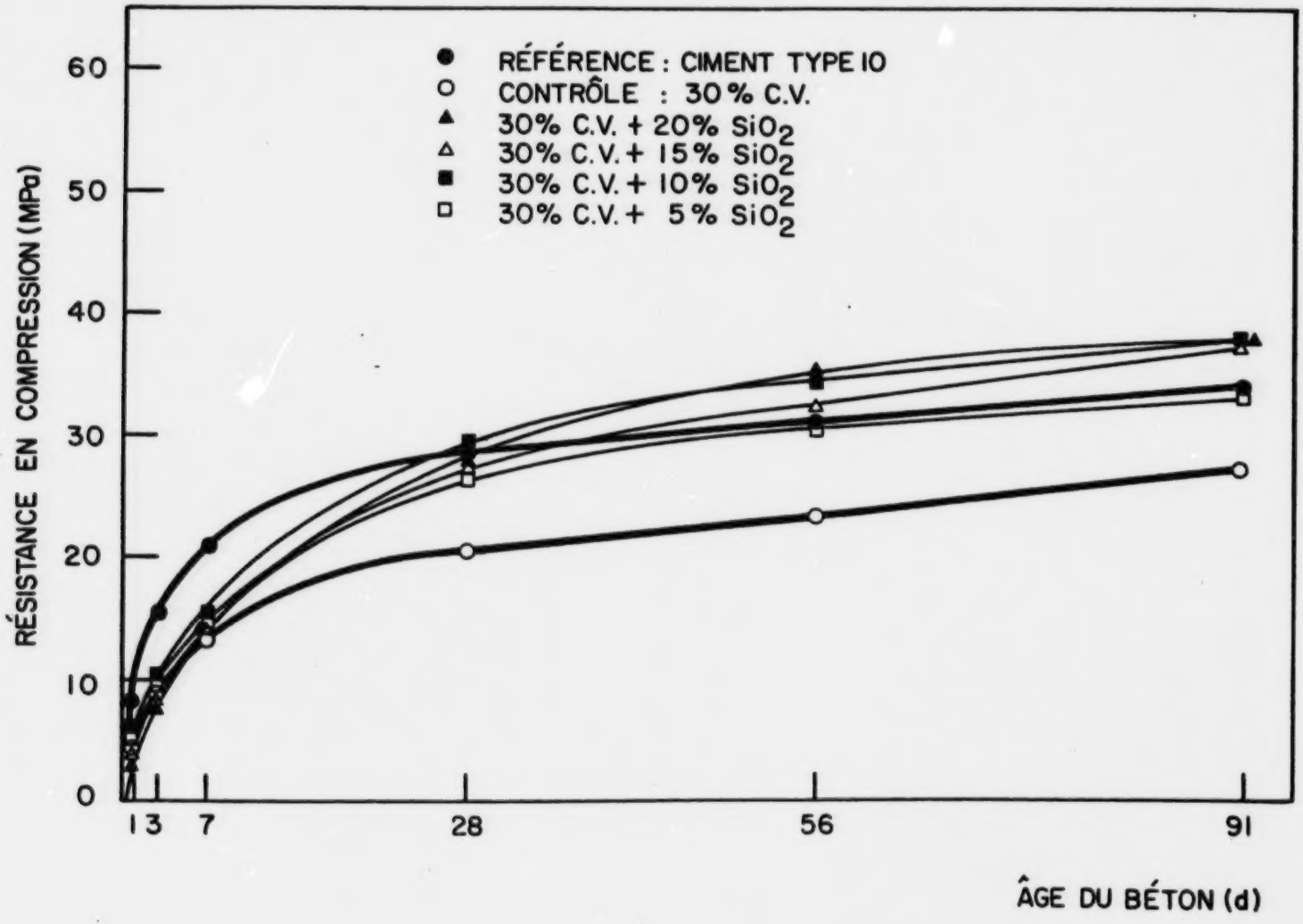



Figure 9 - Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,65.

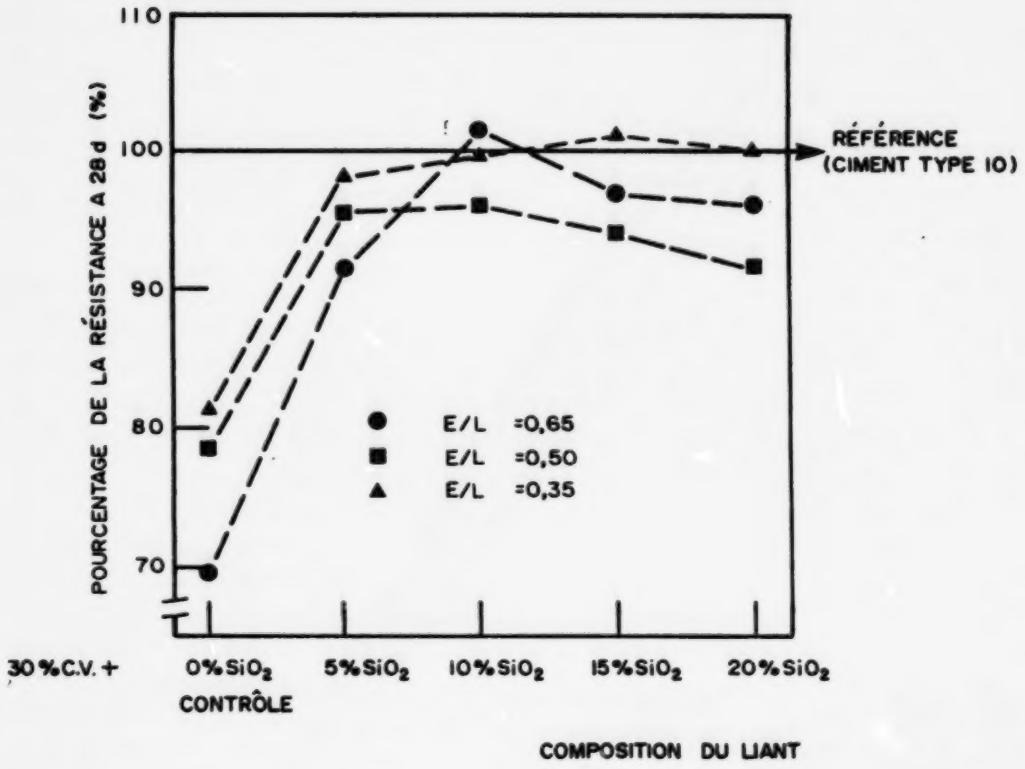



Figure 10 - Pourcentage de la résistance atteinte à 28 d pour les différents bétons, par rapport aux mélanges de référence pour les trois rapports E/L.

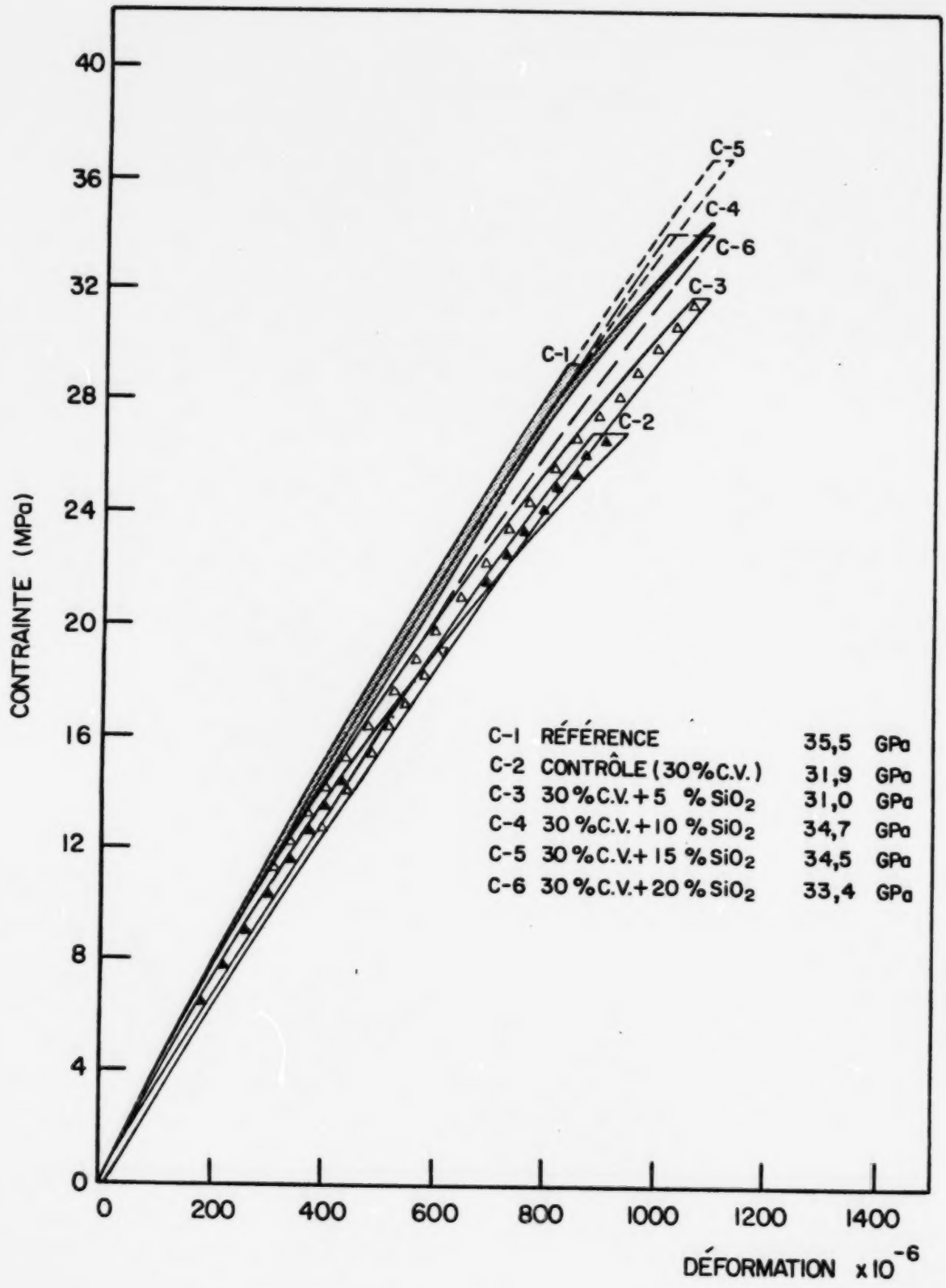



Figure 11- Module d'élasticité des bétons ayant un rapport E/L de 0,35.

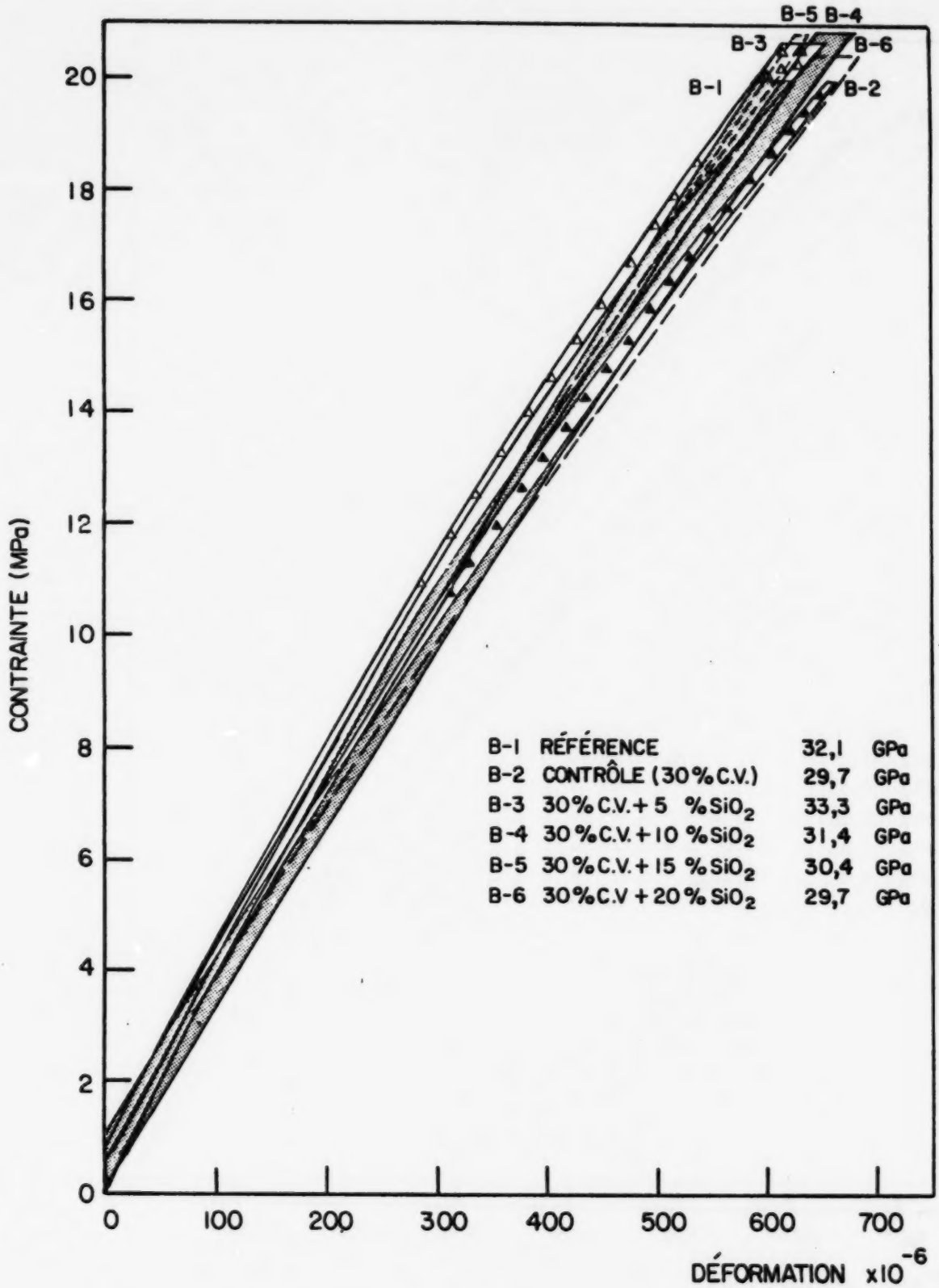



Figure 12- Module d'élasticité des bétons ayant un rapport E/L de 0,50.

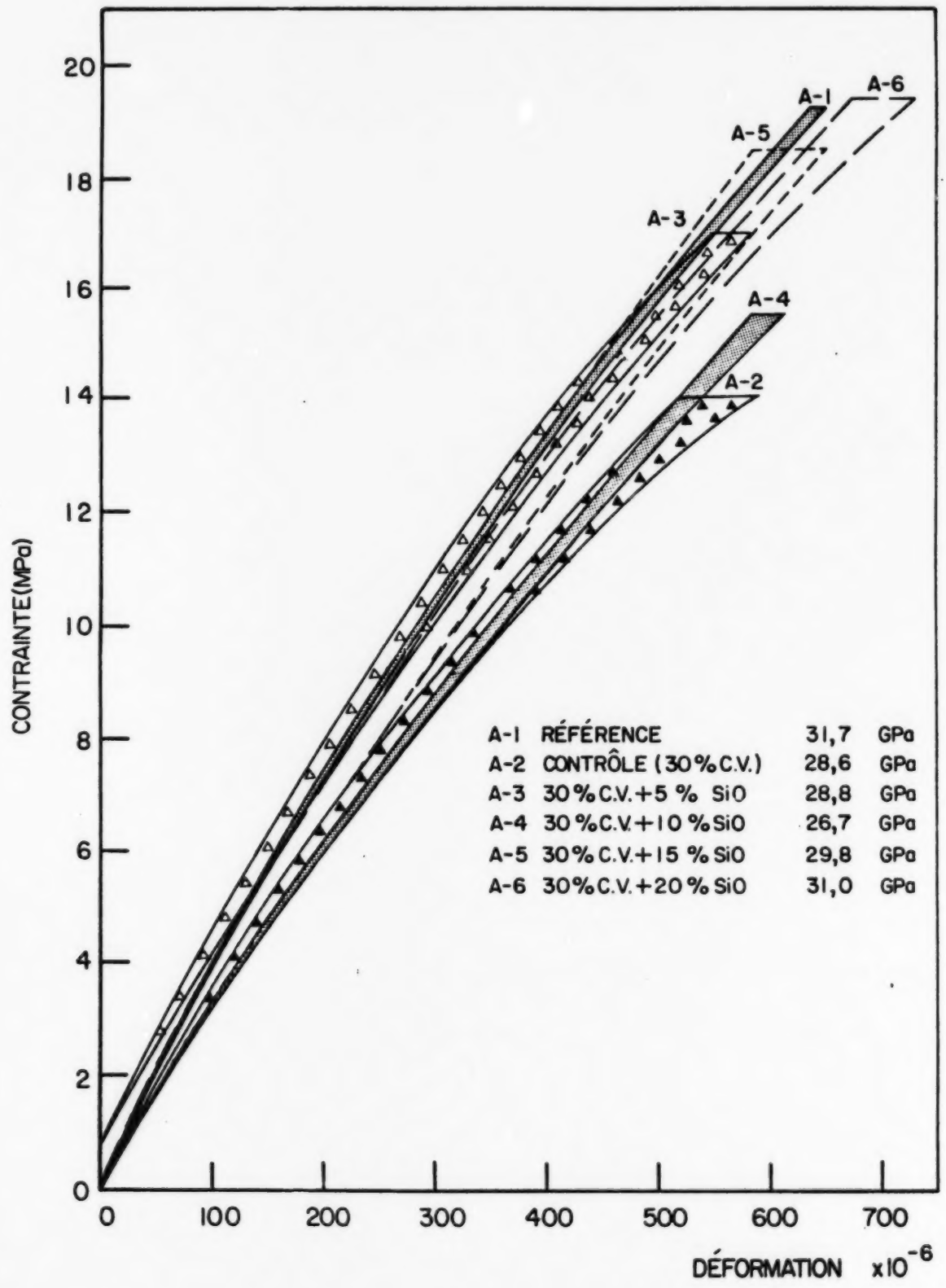



Figure 13- Module d'élasticité des bétons ayant un rapport E/L de 0,65.

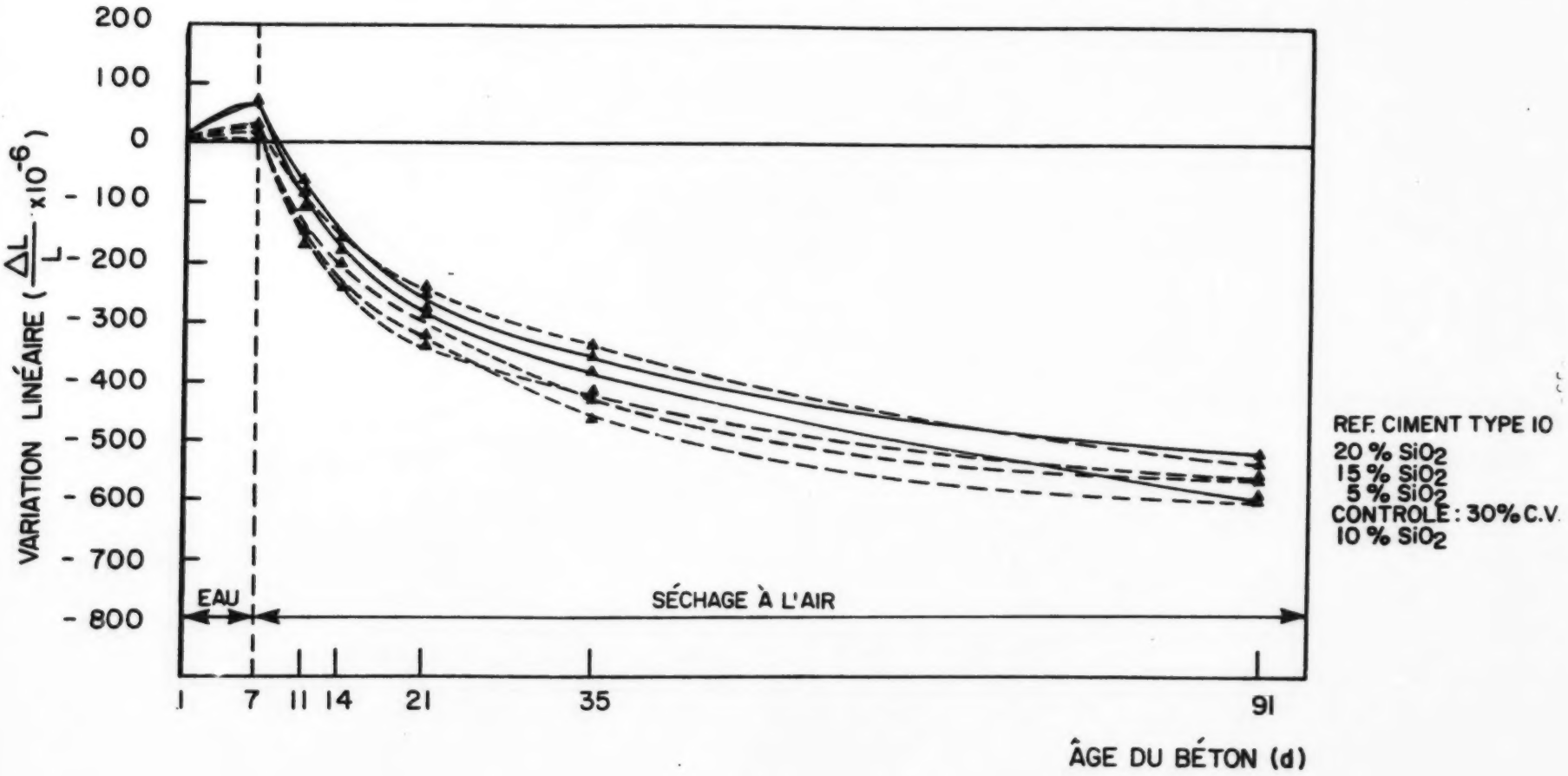



Figure 14 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 qui a été mûri 7 d dans l'eau.

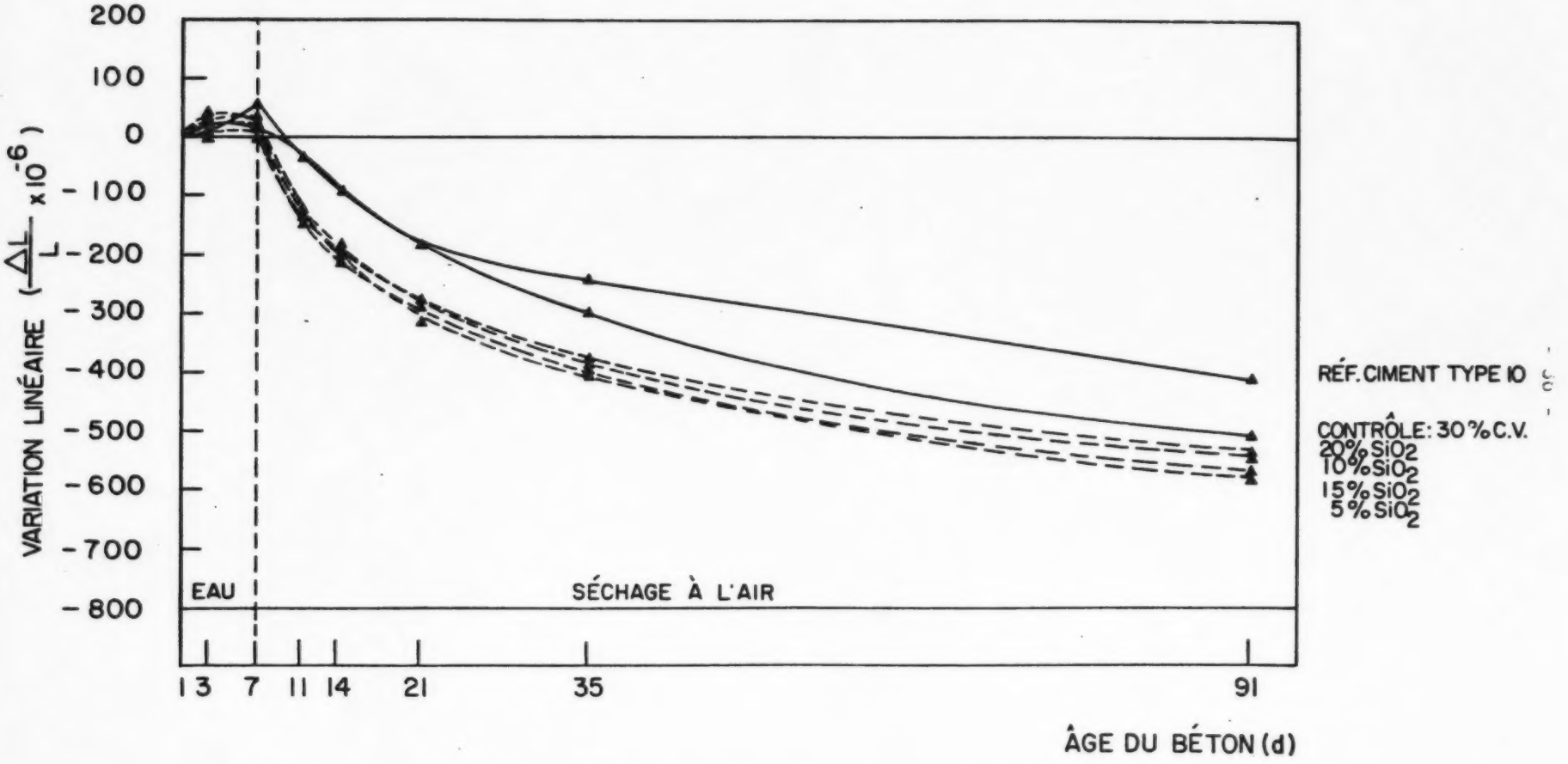



Figure 15 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 qui a été mûri 7 d dans l'eau.

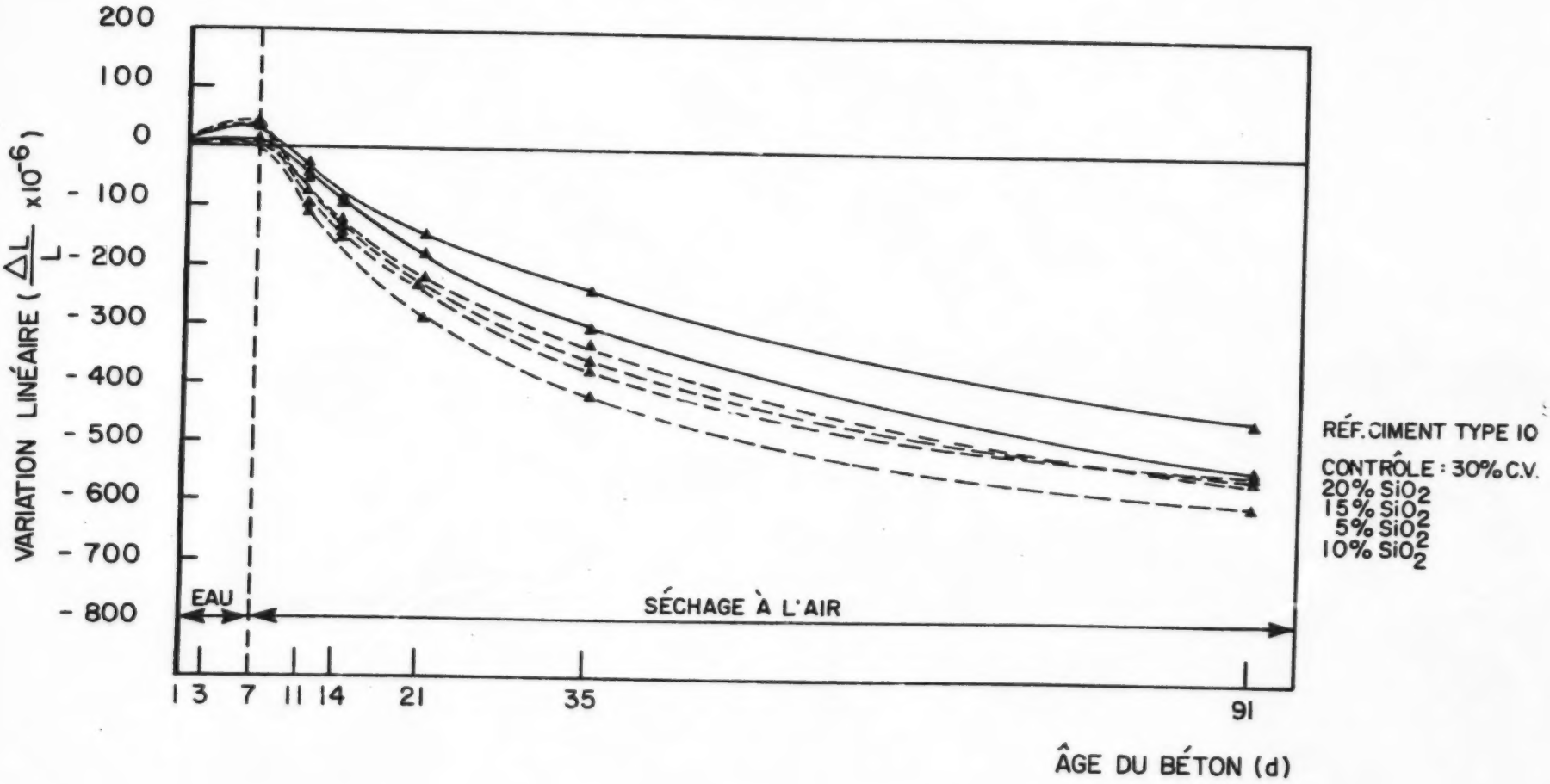



Figure 16- Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 qui a été mûri 7 d dans l'eau.

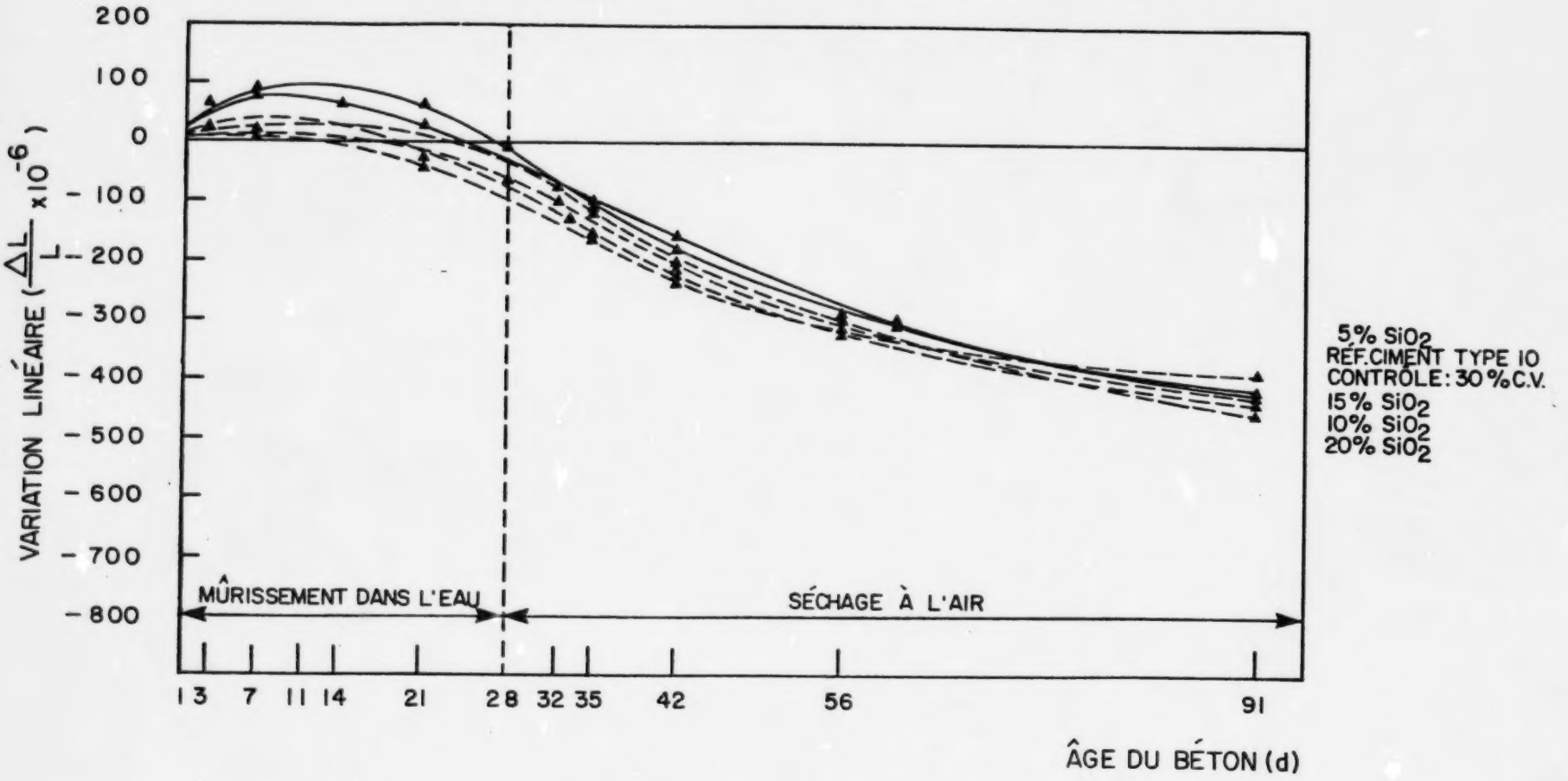



Figure 17 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

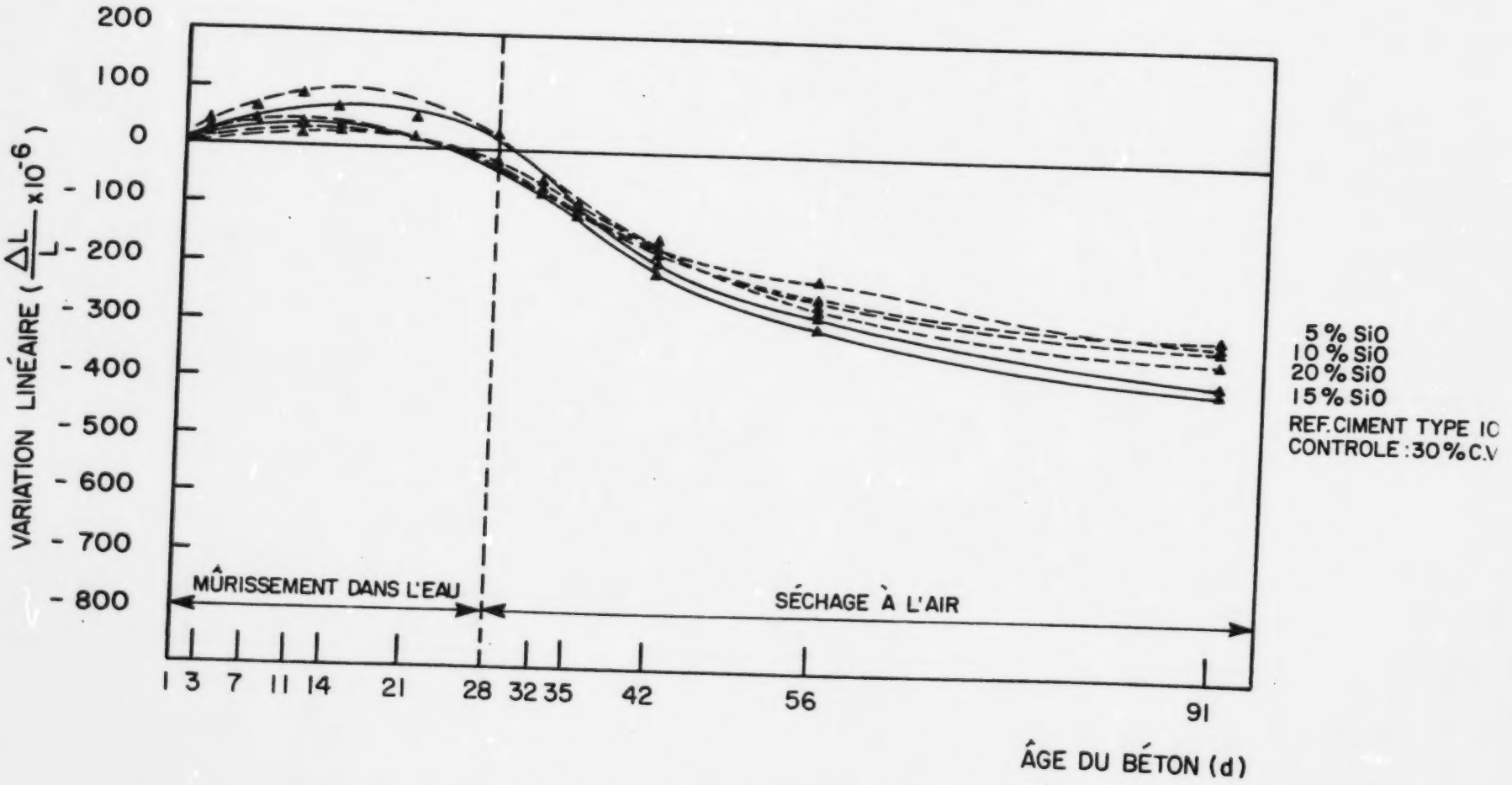



Figure 18 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

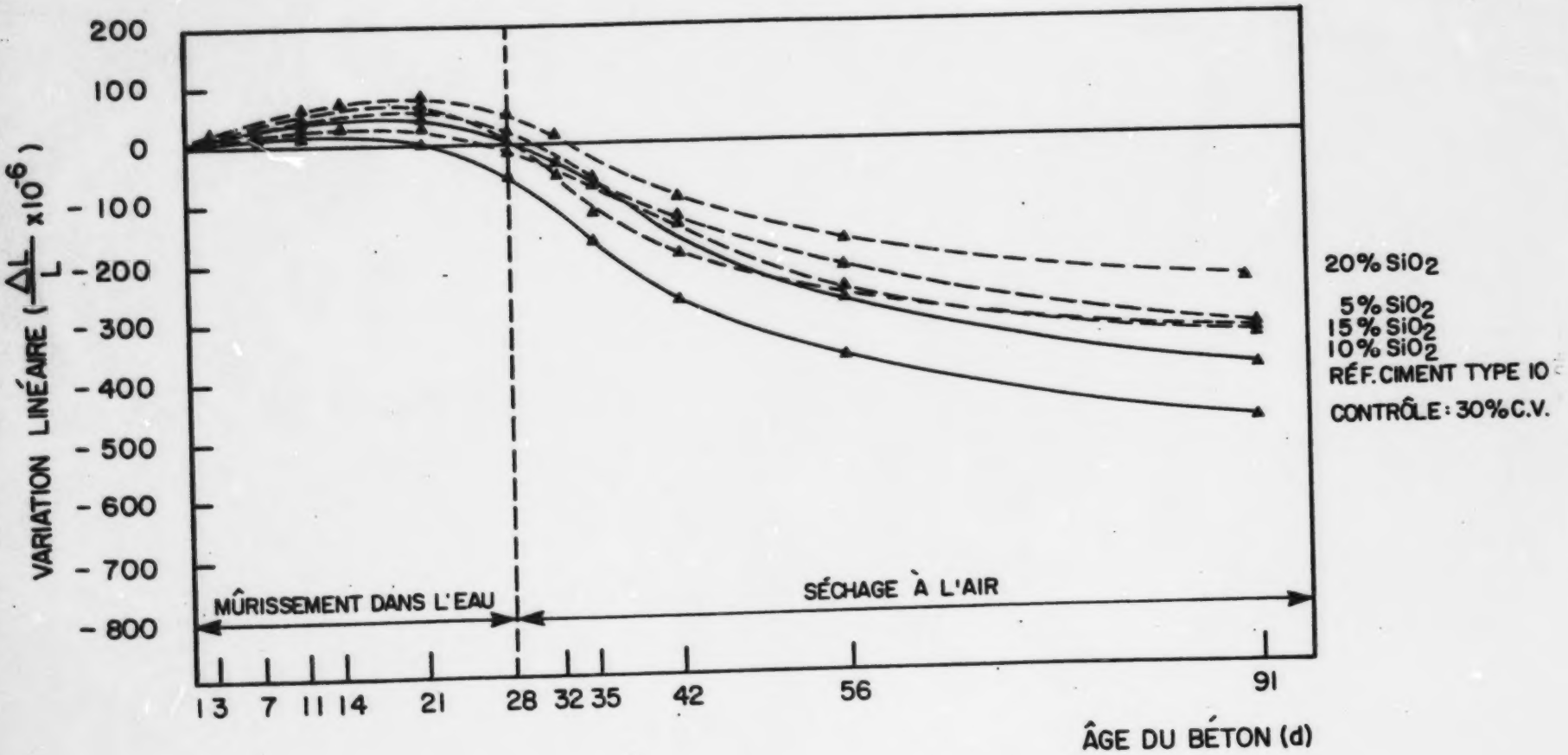



Figure 19- Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

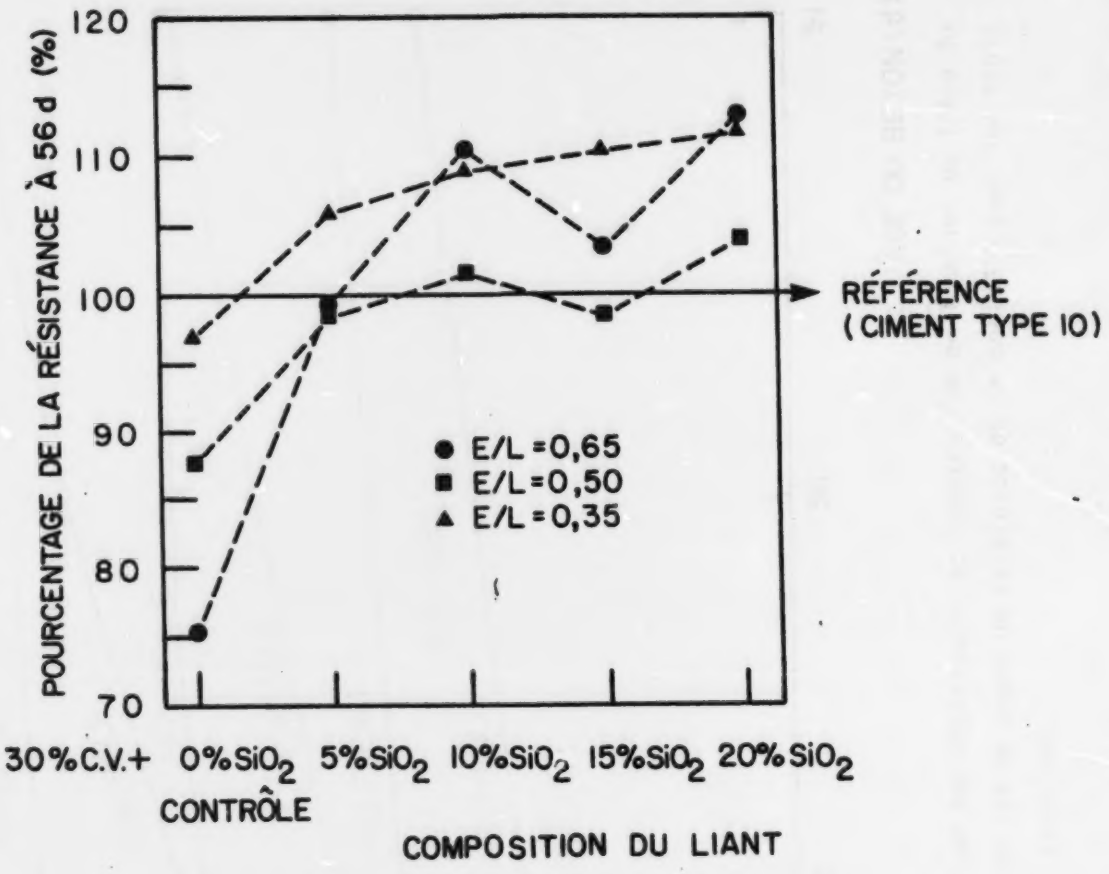



Figure 20 - Pourcentage de la résistance atteinte à 56 d pour les différents bétons, par rapport aux mélanges de référence pour les trois rapports Eau/Liant.

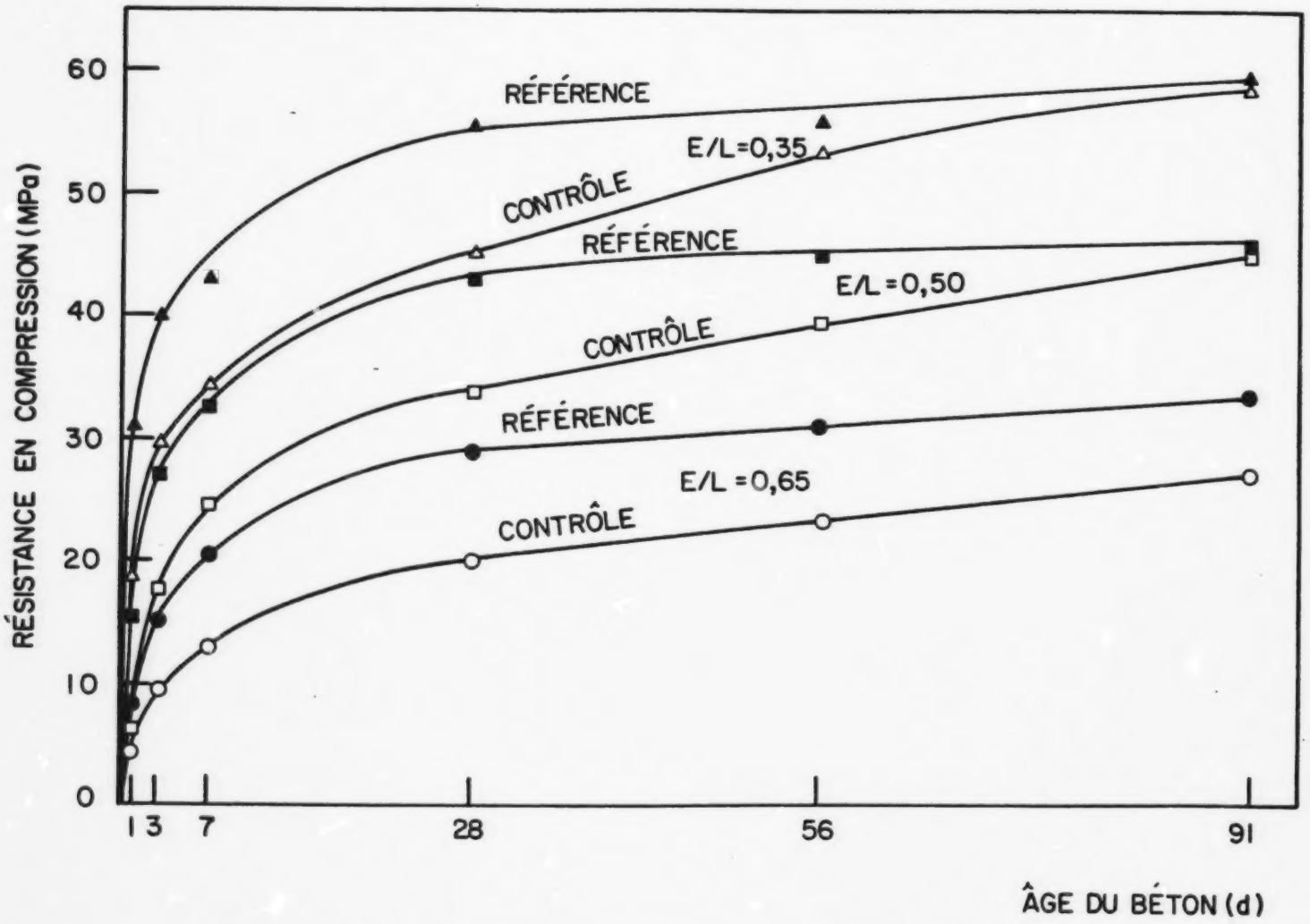



Figure 21- Comparaison des résistances en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges de référence et de contrôle pour les trois rapports Eau/Liant.

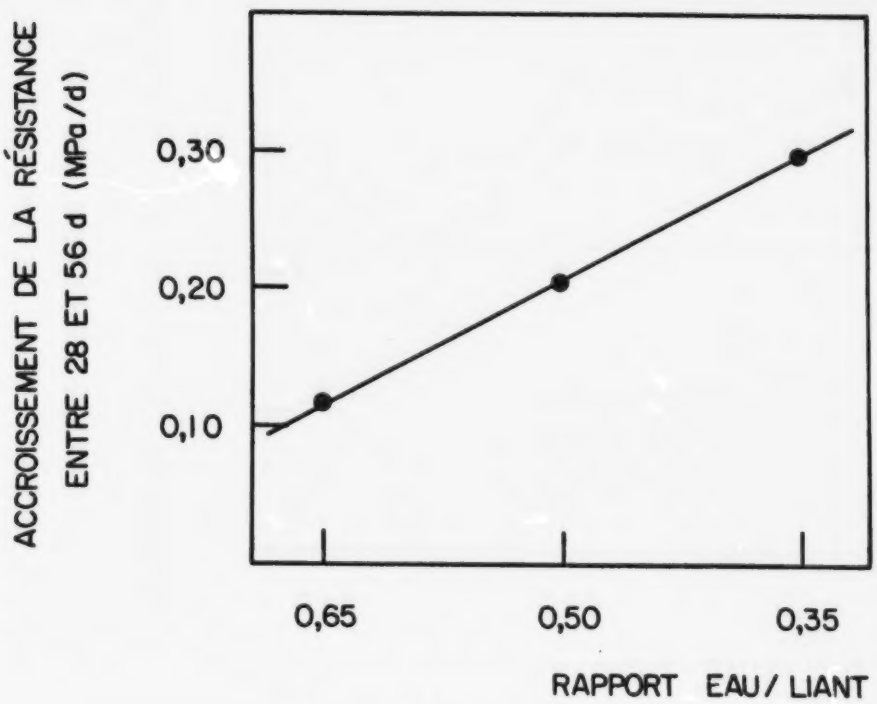



Figure 22 - Accroissement de la résistance des mélanges de contrôle (30% C.V.) entre 28 d et 56 d en fonction du rapport Eau/Liant.

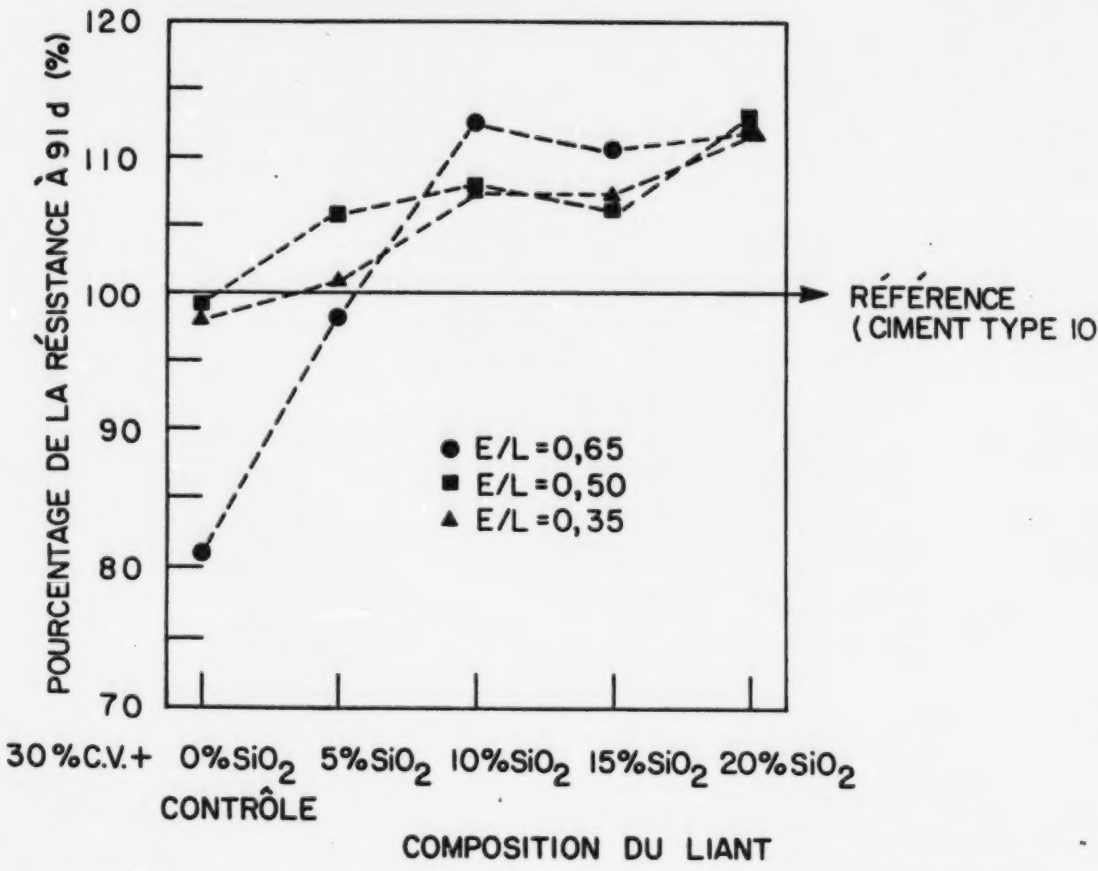



Figure 23 - Pourcentage de la résistance atteinte à 91 d pour les différents bétons par rapport aux mélanges de référence pour les trois rapports Eau/Liant.

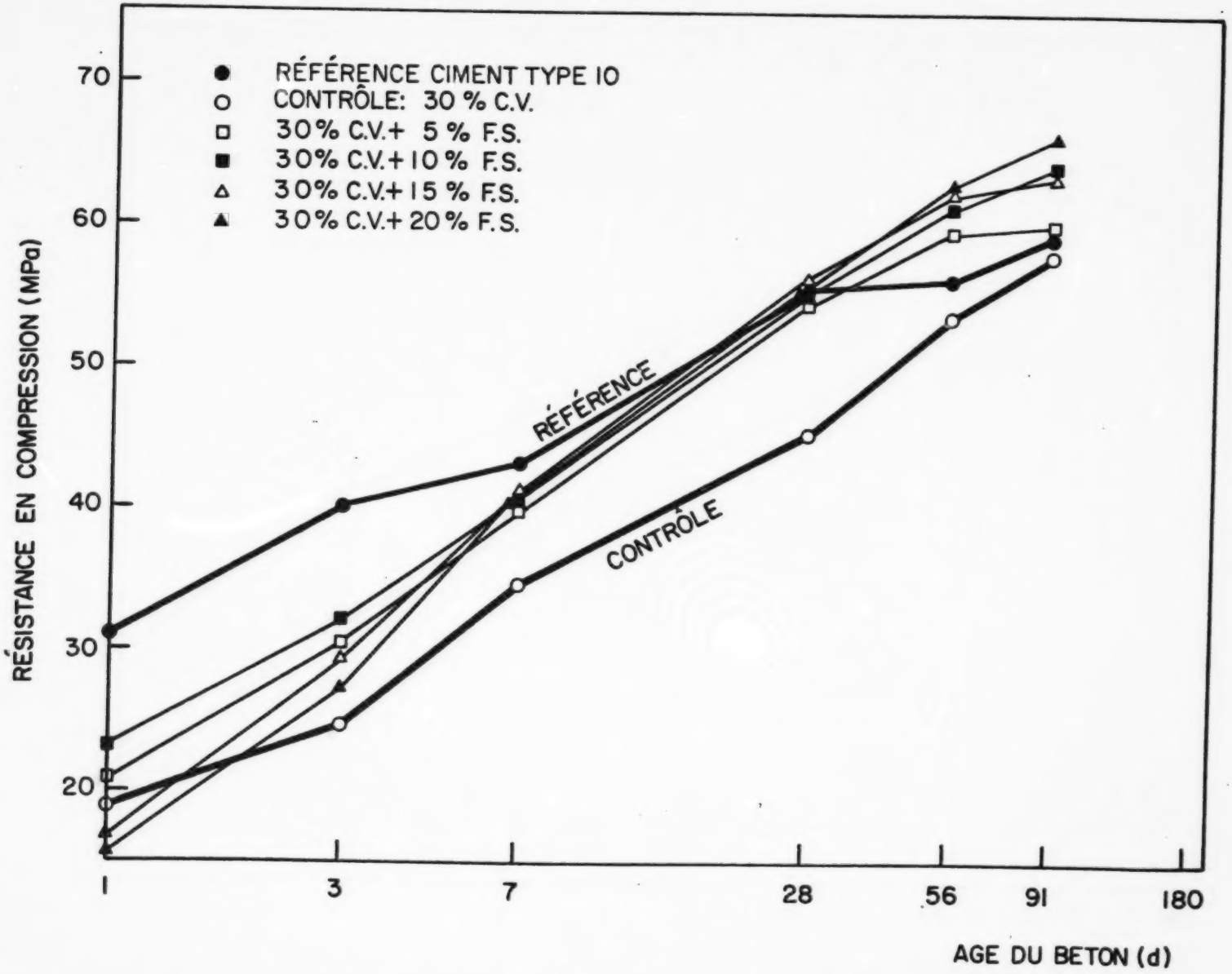



Figure 24 - Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,35.

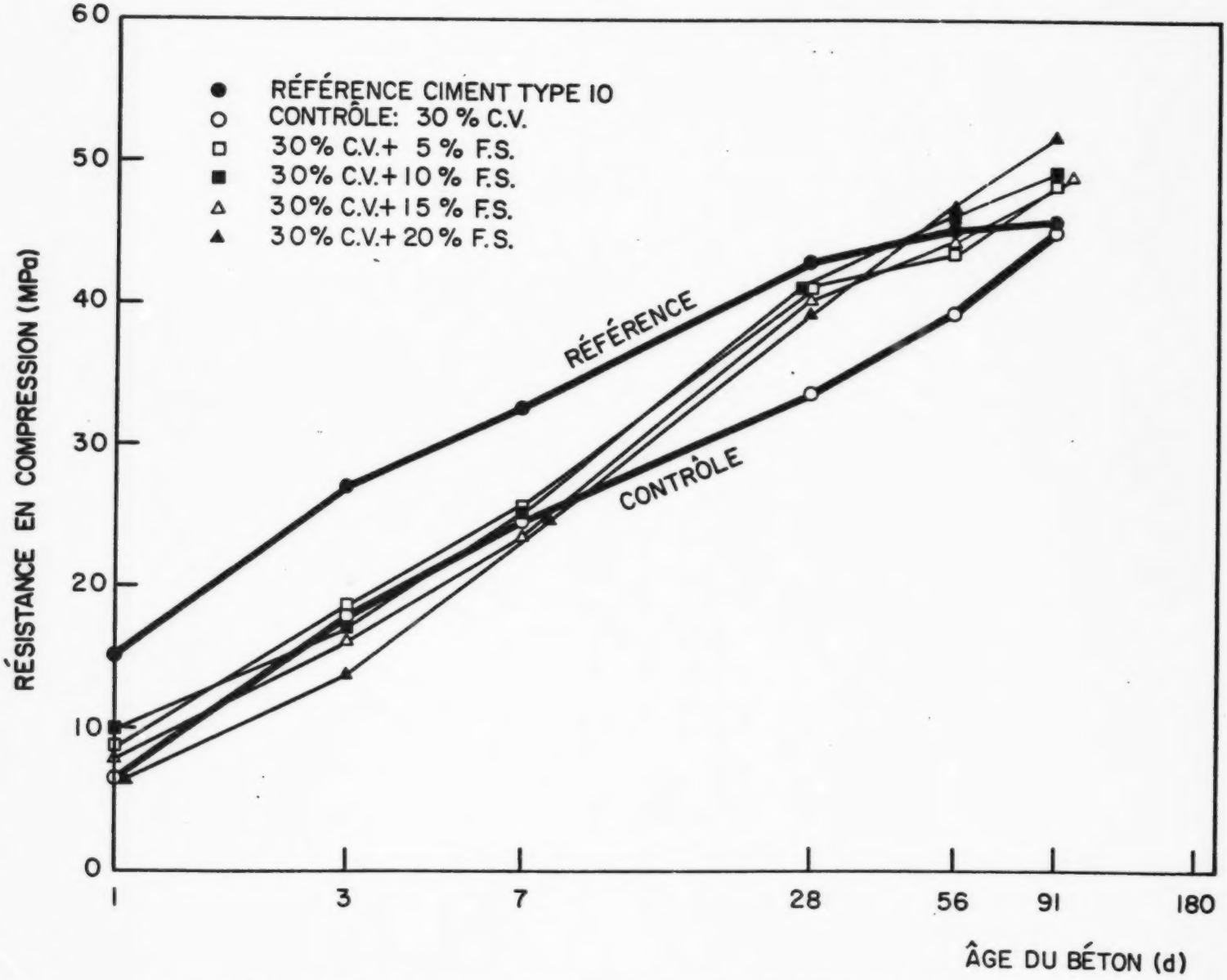



Figure 25 - Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0.50

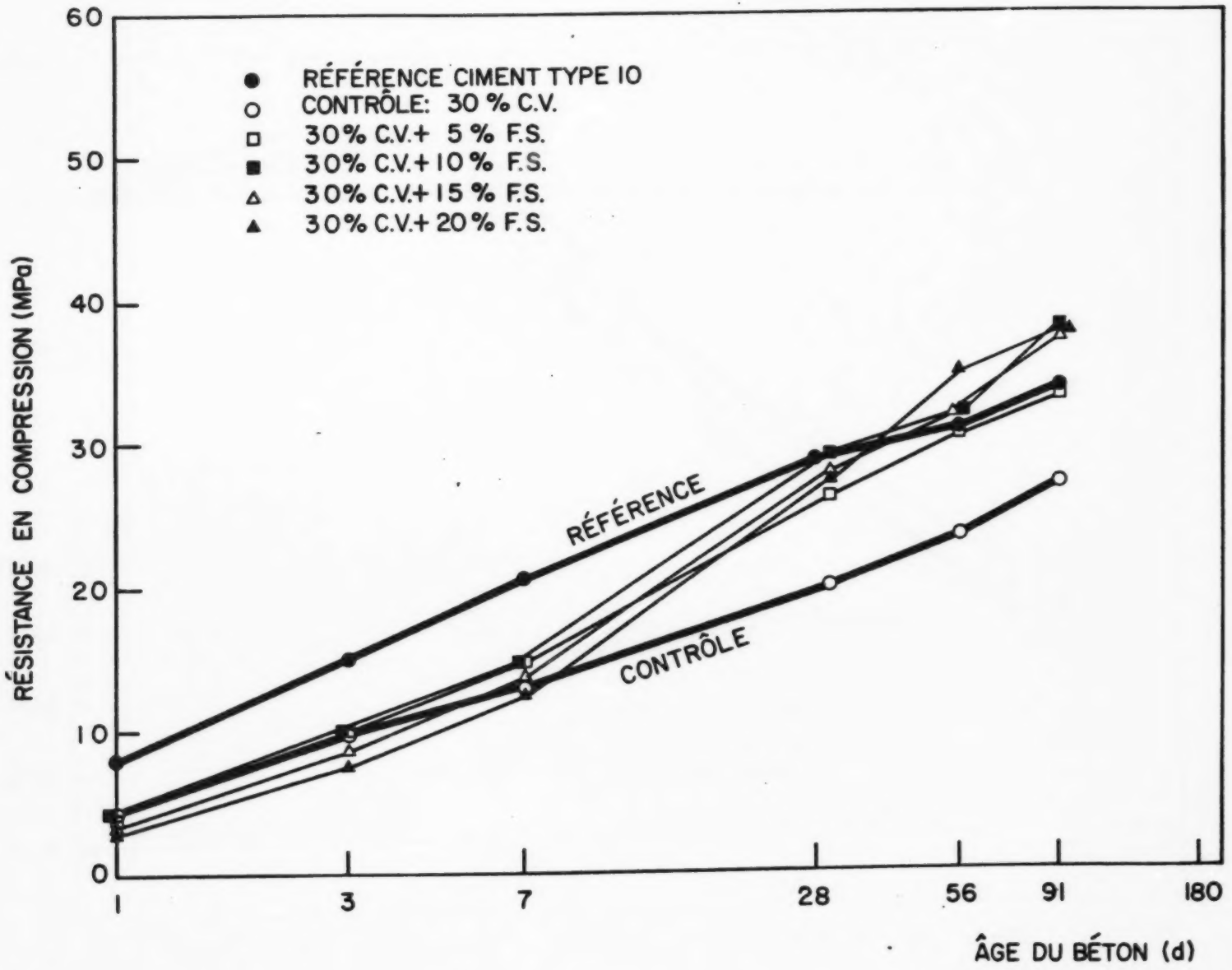



Figure 26 - Résistance en compression en fonction de l'âge du béton pour les mélanges ayant un rapport Eau/Liant de 0,65.

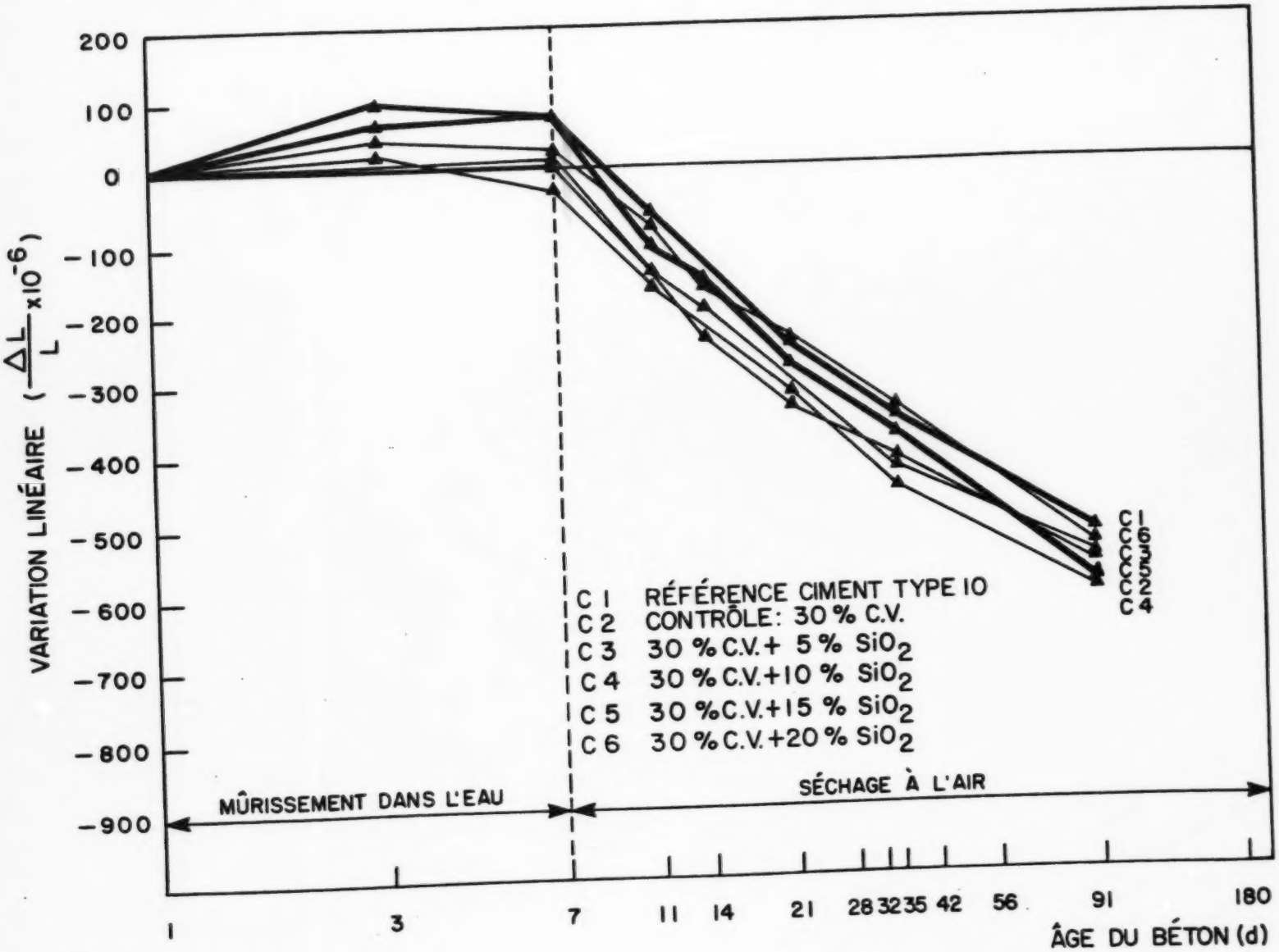



Figure 27 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,35

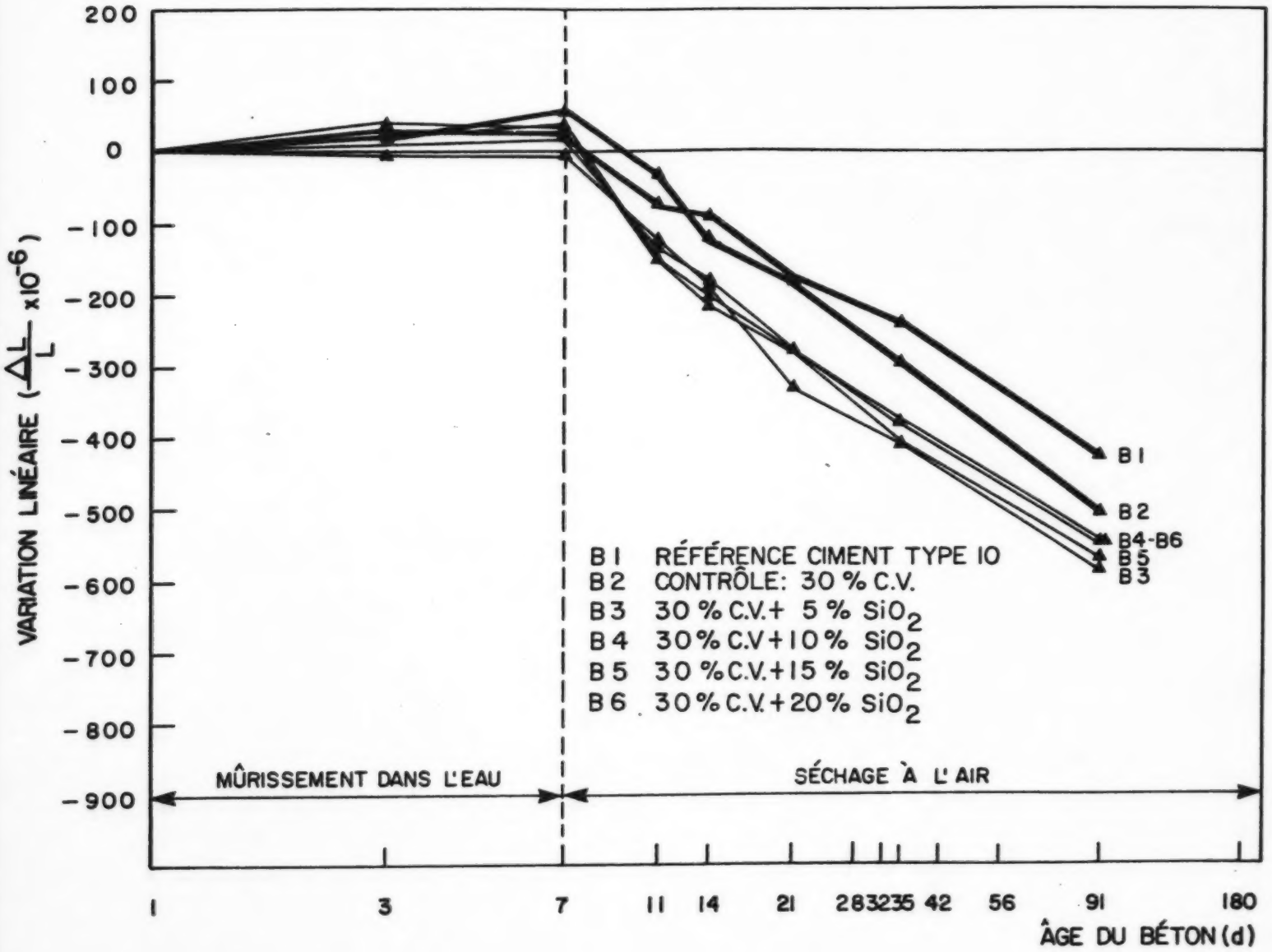



Figure 28 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 qui a été mûri 7 d dans l'eau.

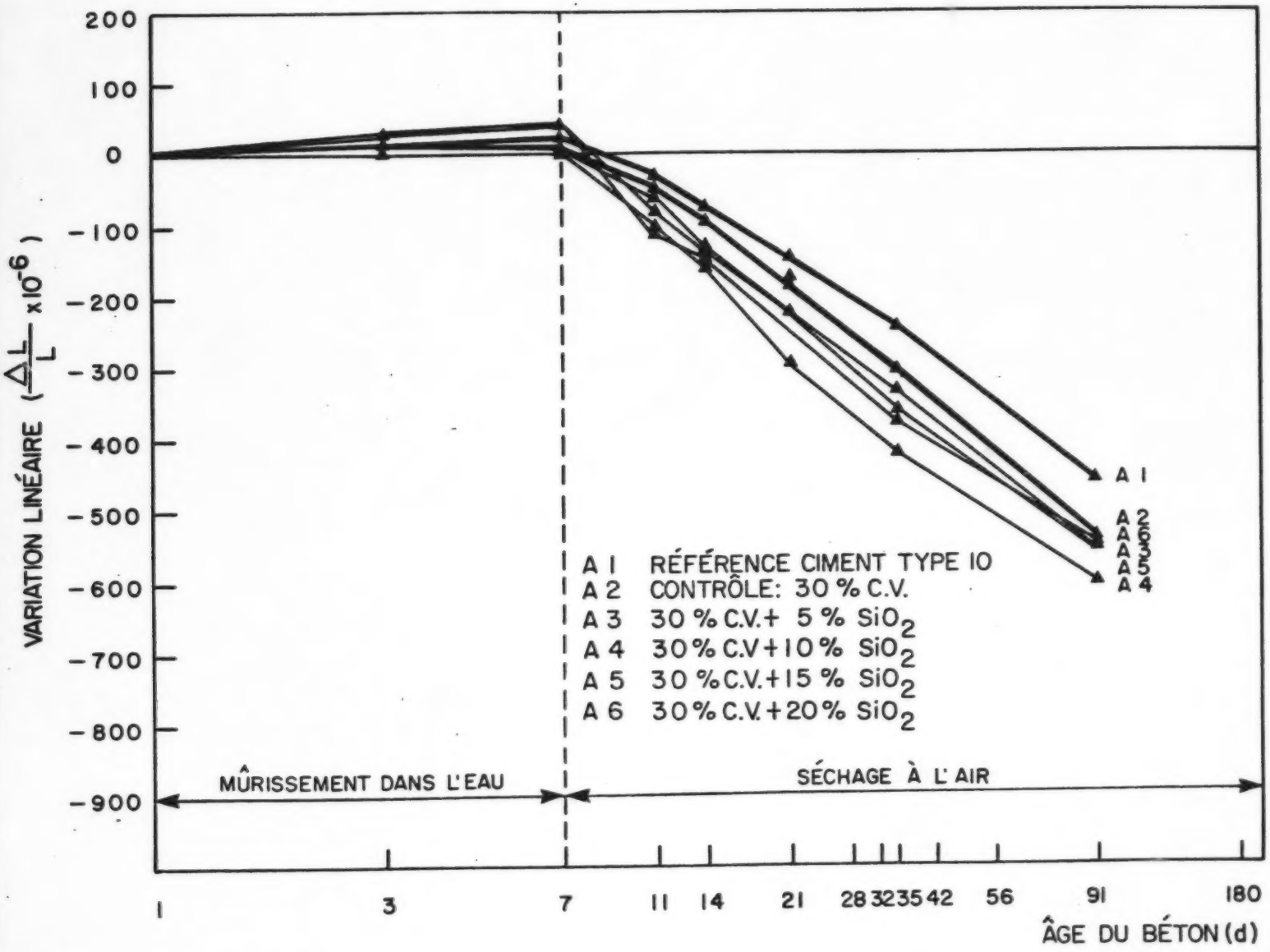



Figure 29 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 qui a été mûri 7 d dans l'eau.

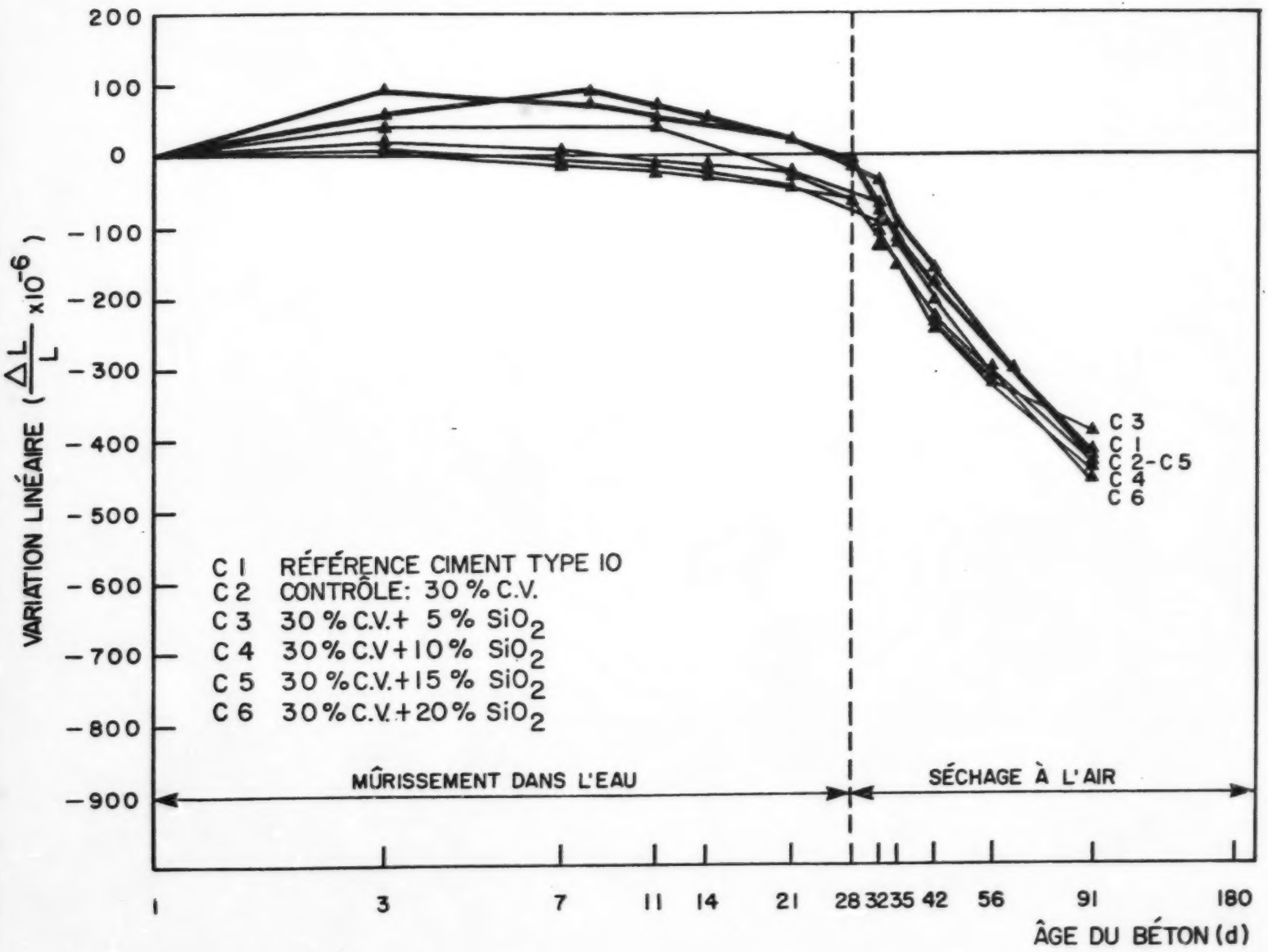



Figure 30 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,35 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

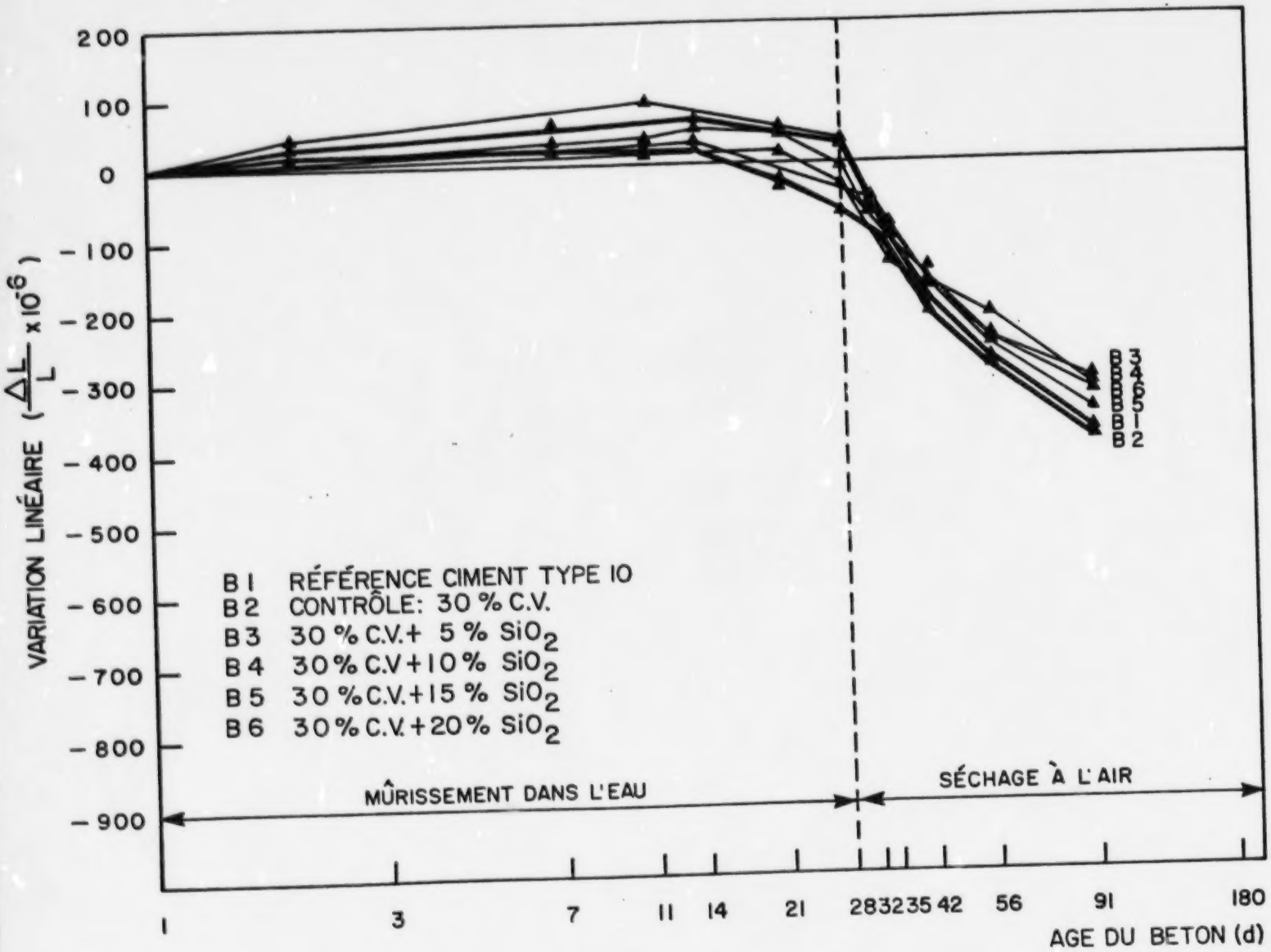



Figure 31 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,50 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

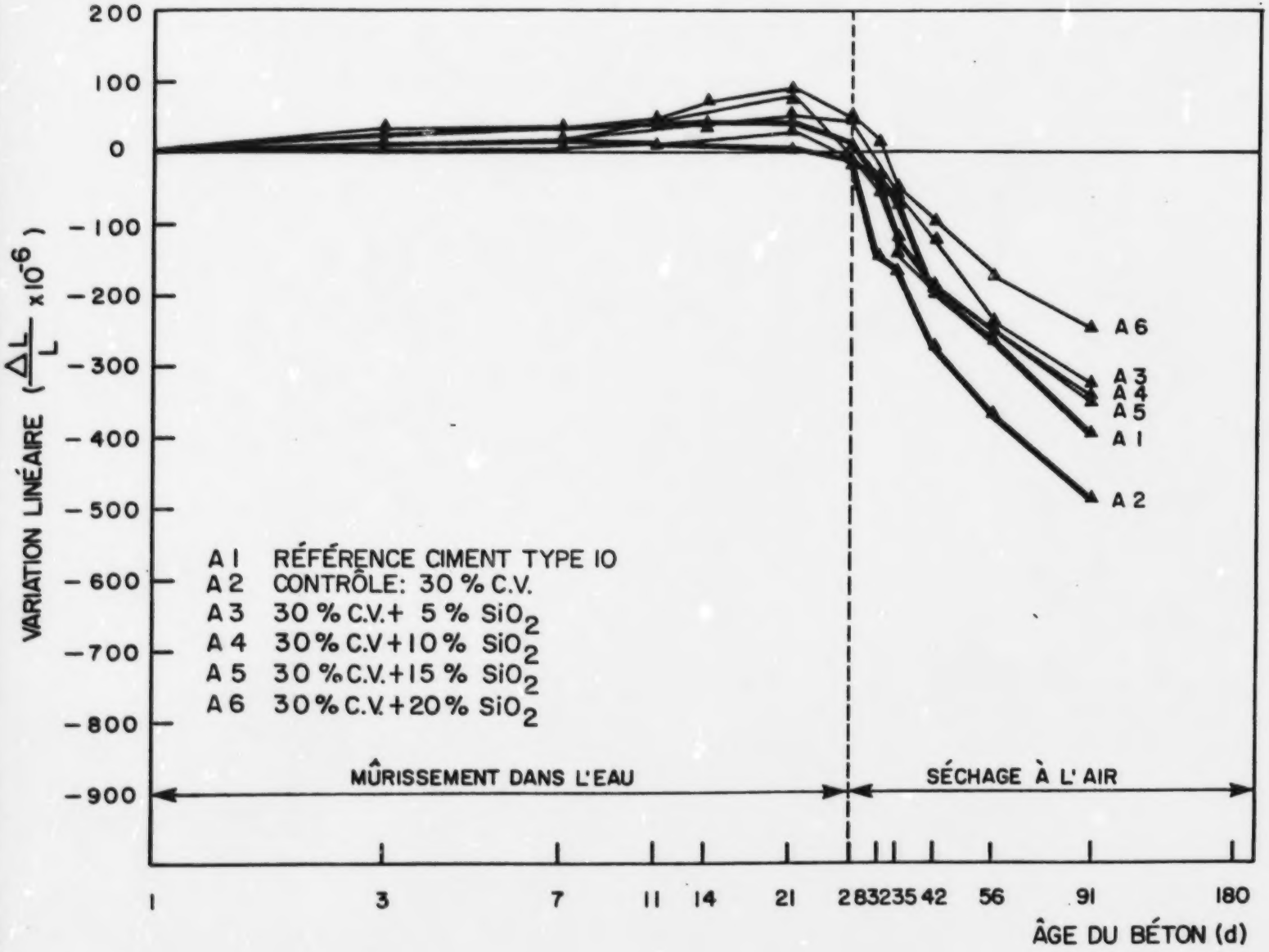



Figure 32 - Retrait au séchage du béton ayant un rapport Eau/Liant de 0,65 qui a été mûri 28 d dans l'eau.

# ANNEXES

# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

## LABORATOIRE DES MATÉRIAUX
## COMPOSITION DES BÉTONS

| IDENTIFICATION DU BÉTON | | | Réf. Ciment Type 10 | Contrôle 30% C.V. | 30% C.V. 5% $SiO_2$ | 30% C.V. 10% $SiO_2$ | 30% C.V. 15% $SiO_2$ | 30% C.V. 20% $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATE DE LA GACHÉE | | | 10-12-82 | 10-12-82 | 13-12-82 | 14-12-82 | 15-12-82 | 16-12-82 |
| RÉSULTATS | CIMENT (kg) | | 570 | 400 | 370 | 340 | 310 | 280 |
| | SUPERPLASTIFIANT(L) | | - | 1,5 | 2,4 | 3,4 | 4,2 | 5,3 |
| | AUTRES | Cendre volante | 0 | 172 | 171 | 171 | 170 | 170 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 29 | 57 | 85 | 115 |
| | | | | | | | | |
| | $E/C$ | | 0,35 | 0,50 | 0,54 | 0,59 | 0,65 | 0,70 |
| | $E/C+POUDRE$ | | - | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| | AFFAISSEMENT (mm) | | 75 | 80 | 80 | 80 | 80 | 75 |
| | AIR (%) | | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,5 | 1,6 |
| | TEMPÉRATURE EN °C | | 22 | 22,5 | 22,5 | 22,5 | 21,0 | 24 |
| MASSE VOLUMIQUE ($kg/m^3$) | BÉTON FRAIS | | 2435 | 2390 | 2380 | 2365 | 2350 | 2335 |
| | BÉTON DURCI AGE (d) | | 2450 | 2410 | 2390 | 2380 | 2350 | 2350 |
| COMPOSITION ($kg/m^3$) | EAU | | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 195 |
| | CIMENT | | 570 | 400 | 370 | 340 | 312 | 280 |
| | SABLE | | 595 | 545 | 545 | 535 | 525 | 515 |
| | PIERRE | | 1070 | 1070 | 1070 | 1065 | 1060 | 1060 |
| | AUTRES | cendre volante | 0 | 172 | 171 | 171 | 170 | 170 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 29 | 57 | 85 | 115 |
| | | | | | | | | |
| ADJUVANTS | A.E.A (ml) | | - | - | - | - | - | - |
| | DISPERSANT (ml) | | - | - | - | - | - | - |
| | SUPERPLASTIFIANT(L) | | - | 1,5 | 2,35 | 3,4 | 4,2 | 5,3 |

**Tableau A-1- Composition et caractéristique des bétons de rapport E/L = 0,35**

# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

## LABORATOIRE DES MATÉRIAUX
## COMPOSITION DES BÉTONS

| IDENTIFICATION DU BÉTON | | | Réf. Ciment Type 10 | Contrôle 30% C.V. | 30% C.V. 5% $SiO_2$ | 30% C.V 10% $SiO_2$ | 30% C.V. 15% $SiO_2$ | 30% C.V. 20% $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATE DE LA GACHÉE | | | 30-11-82 | 01-12-82 | 02-12-82 | 03-12-82 | 06-12-82 | 07-12-82 |
| RÉSULTATS | CIMENT (kg) | | 345 | 240 | 225 | 210 | 190 | 175 |
| | SUPERPLASTIFIANT (L) | | - | - | 1,2 | 1,8 | 2,6 | 3,3 |
| | AUTRES | Cendre volante | 0 | 103 | 103 | 104 | 104 | 103 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 17 | 34 | 52 | 69 |
| | | | | | | | | |
| | $E/C$ | | 0,49 | 0,73 | 0,78 | 0,83 | 0,92 | 1,00 |
| | $E/C+POUDRE$ | | - | 0,51 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,51 |
| | AFFAISSEMENT (mm) | | 75 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | AIR (%) | | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| | TEMPÉRATURE EN °C | | 20,5 | 22 | 23,5 | 23,5 | 23 | 22,5 |
| MASSE VOLUMIQUE (kg / m3) | BÉTON FRAIS | | 2425 | 2415 | 2400 | 2410 | 2400 | 2390 |
| | BÉTON DURCI AGE 1 (d) | | 2450 | 2435 | 2425 | 2415 | 2400 | 2410 |
| COMPOSITION (kg / m3) | EAU | | 170 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| | CIMENT | | 345 | 240 | 225 | 210 | 190 | 175 |
| | SABLE | | 850 | 830 | 825 | 825 | 815 | 805 |
| | PIERRE | | 1060 | 1065 | 1060 | 1070 | 1065 | 1065 |
| | AUTRES | Cendre volante | 0 | 103 | 103 | 104 | 104 | 103 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 17 | 34 | 52 | 69 |
| | | | | | | | | |
| ADJUVANTS | A.E.A (ml) | | - | - | - | - | - | - |
| | DISPERSANT (ml) | | - | - | - | - | - | - |
| | SUPERPLASTIFIANT (L) | | - | - | 1,2 | 1,8 | 2,6 | 3,3 |

Tableau A-2- Composition et caractéristique des bétons de rapport E/L = 0,50

# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

## LABORATOIRE DES MATÉRIAUX

## COMPOSITION DES BÉTONS

| IDENTIFICATION DU BÉTON | | | Réf. Ciment Type 10 | Contrôle 30% C.V. | 30% C.V. 5% $SiO_2$ | 30% C.V. 10% $SiO_2$ | 30% C.V. 15% $SiO_2$ | 30% C.V. 20% $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATE DE LA GACHÉE | | | 17-11-82 | 18-11-82 | 23-11-82 | 24-11-82 | 25-11-82 | 26-11-82 |
| RÉSULTATS | CIMENT (kg) | | 265 | 185 | 175 | 160 | 145 | 135 |
| | SUPERPLASTIFIANT(L) | | - | - | 0,5 | 1,1 | 1,5 | 2,1 |
| | AUTRES | Cendre volante | 0 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 13 | 26 | 40 | 53 |
| | | | | | | | | |
| | E / C | | 0,66 | 0,95 | 1,00 | 1,09 | 1,21 | 1,29 |
| | E / C + POUDRE | | - | 0,66 | 0,65 | 0,66 | 0,66 | 0,65 |
| | AFFAISSEMENT (mm) | | 75 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| | AIR (%) | | 1,2 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |
| | TEMPÉRATURE EN °C | | 20° | 21° | 22° | 23° | 21,5° | 22,5° |
| MASSE VOLUMIQUE (kg / m³) | BÉTON FRAIS | | 2400 | 2395 | 2400 | 2390 | 2390 | 2380 |
| | BÉTON DURCI AGE 1 (d) | | 2440 | 2435 | 2420 | 2415 | 2390 | 2400 |
| COMPOSITION (kg / m³) | EAU | | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 | 175 |
| | CIMENT | | 265 | 185 | 175 | 160 | 145 | 135 |
| | SABLE | | 900 | 895 | 895 | 885 | 885 | 880 |
| | PIERRE | | 1060 | 1060 | 1065 | 1060 | 1065 | 1065 |
| | AUTRES | Cendre volante | 0 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 13 | 26 | 40 | 53 |
| | | | | | | | | |
| ADJUVANTS | A.E.A (ml) | | - | - | - | - | - | - |
| | DISPERSANT (ml) | | - | - | - | - | - | - |
| | SUPERPLASTIFIANT (L) | | - | - | 0,5 | 1,1 | 1,5 | 2,1 |

Tableau A-3- Composition et caractéristique des bétons de rapport E/L = 0,65

# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

## LABORATOIRE DES MATÉRIAUX

### CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON

FRAIS ET DURCI

| IDENTIFICATION DU BÉTON | | | Réf. Ciment Type 10 | Contrôle 30% C.V. | 30% C.V. 5% $SiO_2$ | 30% C.V. 10% $SiO_2$ | 30% C.V. 15% $SiO_2$ | 30% C.V. 20% $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATE DE LA GACHÉE | | | 10-12-82 | 10-12-82 | 13-12-82 | 14-12-82 | 15-12-82 | 16-12-82 |
| RÉSULTATS | CIMENT (kg) | | 570 | 400 | 370 | 340 | 310 | 280 |
| | SUPERPLASTIFIANT(L) | | - | 1,5 | 2,4 | 3,4 | 4,2 | 5,3 |
| | AUTRES | cendre volante | 0 | 172 | 171 | 171 | 170 | 170 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 29 | 57 | 85 | 115 |
| | | | | | | | | |
| | $E/C$ | | 0,35 | 0,50 | 0,54 | 0,59 | 0,65 | 0,70 |
| | $E/C$ + POUDRE | | - | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| | AFFAISSEMENT (mm) | | 75 | 80 | 80 | 80 | 80 | 75 |
| | AIR (%) | | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,5 | 1,6 |
| RÉSISTANCE EN COMPRESSION (MPa) | 1 d | | 31,0 | 18,9 | 20,7 | 18,2 | 16,7 | 15,6 |
| | 3 d | | 40,0 | 29,6 | 30,5 | 32,2 | 29,4 | 27,4 |
| | 7 d | | 43,1 | 34,5 | 39,7 | 40,4 | 41,0 | 40,2 |
| | 14 d | | - | - | - | - | - | - |
| | 28 d | | 55,5 | 45,2 | 54,6 | 55,3 | 56,1 | 55,4 |
| | 56 d | | 56,2 | 53,5 | 59,7 | 61,3 | 62,1 | 62,9 |
| | 91 d | | 59,4 | 58,2 | 60,4 | 64,2 | 63,5 | 66,5 |
| | 180 d | | | | | | | |
| | 1 AN | | - | - | - | - | - | - |

Tableau A-4 Caractéristique du béton frais et durci de rapport E/L = 0,35

# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

## LABORATOIRE DES MATÉRIAUX

### CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON

FRAIS ET DURCI

| IDENTIFICATION DU BÉTON | | | Réf. Ciment Type 10 | Contrôle 30% C.V. | 30% C.V. 5% $SiO_2$ | 30% C.V. 10% $SiO_2$ | 30% C.V. 15% $SiO_2$ | 30% C.V. 20% $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATE DE LA GACHÉE | | | 30-11-82 | 01-12-82 | 02-12-82 | 03-12-82 | 06-12-82 | 07-12-82 |
| RÉSULTATS | CIMENT (kg) | | 345 | 240 | 225 | 210 | 190 | 175 |
| | SUPERPLASTIFIANT(L) | | - | - | 1,2 | 1,8 | 2,6 | 3,3 |
| | AUTRES | cendre volante | 0 | 103 | 103 | 104 | 104 | 103 |
| | | $SiO_2$ | 0 | 0 | 17 | 34 | 52 | 69 |
| | | | | | | | | |
| | $E/C$ | | 0,49 | 0,73 | 0,78 | 0,83 | 0,92 | 1,00 |
| | $E/C$ + POUDRE | | 0,51 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,51 |
| | AFFAISSEMENT (mm) | | 75 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | AIR (%) | | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| RÉSISTANCE EN COMPRESSION (MPa) | 1 d | | 15,3 | 6,5 | 8,8 | 9,9 | 8,0 | 6,5 |
| | 3 d | | 27,2 | 17,6 | 18,5 | 17,3 | 16,0 | 13,8 |
| | 7 d | | 32,5 | 24,7 | 25,7 | 25,2 | 23,5 | 24,8 8 d |
| | 14 d | | - | - | - | - | - | - |
| | 28 d | | 43,0 | 33,7 | 41,1 | 41,3 | 40,5 | 39,4 |
| | 56 d | | 45,0 | 39,4 | 43,5 | 45,8 | 44,5 | 46,8 |
| | 91 d | | 45,7 | 45,1 | 48,5 | 49,3 | 48,7 | 51,7 |
| | 180 d | | | | | | | |
| | 1 AN | | - | - | - | - | - | - |

Tableau A-5- Caractéristique du béton frais et durci de rapport E/L = 0,50

# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

## LABORATOIRE DES MATÉRIAUX

### CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON

FRAIS ET DURCI

| IDENTIFICATION DU BÉTON | | Réf. Ciment Type 10 | Contrôle 30% C.V. | 30% C.V. 5% $SiO_2$ | 30% C.V. 10% $SiO_2$ | 30% C.V. 15% $SiO_2$ | 30% C.V. 20% $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DATE DE LA GACHÉE | | 17-11-82 | 18-11-82 | 23-11-82 | 24-11-82 | 25-11-82 | 26-11-82 |
| RÉSULTATS | CIMENT (kg) | 265 | 185 | 175 | 160 | 145 | 135 |
| | SUPERPLASTIFIANT(L) | - | - | 0,5 | 1,1 | 1,5 | 2,1 |
| | AUTRES cendre volante | 0 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | AUTRES $SiO_2$ | 0 | 0 | 13 | 26 | 40 | 53 |
| | AUTRES | | | | | | |
| | E / C | 0,66 | 0,95 | 1,00 | 1,09 | 1,21 | 1,29 |
| | E / C + POUDRE | - | 0,66 | 0,65 | 0,66 | 0,66 | 0,65 |
| | AFFAISSEMENT (mm) | 75 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| | AIR (%) | 1,2 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,1 |
| RÉSISTANCE EN COMPRESSION (MPa) | 1 d | 8,3 | 4,4 | 3,9 | 4,4 | 3,7 | 3,3 |
| | 3 d | 15,2 | 9,7 | 9,7 | 9,8 | 8,6 | 7,6 |
| | 7 d | 20,5 | 13,0 | 14,6 | 14,7 | 13,5 | 13,9 |
| | 14 d | - | - | - | - | - | - |
| | 28 d | 28,8 | 20,0 | 26,4 | 29,3 | 28,0 | 27,7 |
| | 56 d | 30,9 | 23,3 | 30,7 | 34,2 | 32,0 | 35,0 |
| | 91 d | 33,6 | 27,1 | 33,2 | 37,9 | 37,2 | 37,6 |
| | 180 d | | | | | | |
| | 1 AN | - | - | - | - | - | - |

Tableau A-6-Caractéristique du béton frais et durci de rapport E/L = 0,65

| IDENTIFICATION DU MELANGE | EAU/LIANT 0,35 | | | | EAU/LIANT 0,50 | | | | EAU/LIANT 0,65 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N° de la gâchée | | | | N° de la gâchée | | | | N° de la gâchée | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Référence Ciment Type 10 | 55,5 | 51,0 | 53,2 | 54,3 | 43,0 | 43,0 | 42,4 | 44,2 | 28,8 | 31,2 | 29,8 | 29,0 |
| Contrôle 30% C.V. | 45,2 | 44,9 | 44,8 | 44,9 | 33,7 | 34,4 | 34,4 | 34,6 | 20,0 | 23,3 | 23,0 | 20,2 |
| 30% C.V. + 5% $SiO_2$ | 54,6 | 55,1 | 54,8 | 55,1 | 41,1 | 40,9 | 42,3 | 40,0 | 26,4 | 27,4 | 27,0 | 27,2 |
| 30% C.V. + 10% $SiO_2$ | 55,3 | 55,7 | 58,0 | 58,0 | 41,3 | 41,9 | 41,8 | 40,1 | 29,3 | 29,6 | 29,7 | 29,5 |
| 30% C.V. + 15% $SiO_2$ | 56,1 | 58,3 | 56,7 | 57,7 | 40,5 | 41,6 | 40,3 | 41,2 | 28,0 | 28,0 | 28,6 | 27,7 |
| 30% C.V. + 20% $SiO_2$ | 55,4 | 55,6 | 55,4 | 55,3 | 39,4 | 38,6 | 39,5 | 39,3 | 27,7 | 25,9 | 25,5 | 26,0 |

Tableau A-7 - Résistance en compression des gâchées répétitives

POOR

QUALITY

ORIGINAL